

## 特集「沿岸防災業務強化に向けた業務改善」

# 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び 波浪モデルの現状と展望\*

竹内 仁<sup>\*\*1</sup>・高野 洋雄<sup>\*\*1</sup>・山根 彩子<sup>\*\*1</sup>・松枝 聡子<sup>\*\*2</sup>  
・板倉 太子<sup>\*\*3</sup>・宇都宮 忠吉<sup>\*\*4</sup>・金子 秀毅<sup>\*\*5</sup>・長屋 保幸<sup>\*\*6</sup><sub>※</sub>

### 要 旨

平成 22 年度海洋気象技術検討会で議論された、「波浪ガイダンスの特性調査と補正方法の検討」結果を踏まえ、沿岸防災解説業務に資するための日本周辺海域における波浪特性に関する基礎調査の結果と、解説資料の概要及び数値波浪モデルの現状と今後の展望を取りまとめた。基礎調査として、各海洋気象台では担当海域で特徴的な太平洋側の「うねり」と冬季日本海や台風「風浪」の事例解析をそれぞれ行った。

### 1. はじめに

近年、高潮や波浪など海洋に関する気象災害が顕在化していることから、的確な沿岸防災情報の発表が以前にも増して重要となっている。地球環境・海洋部では、沿岸防災業務強化に向けた業務改善の一環として、適時的確に高潮・波浪等に関

する沿岸防災情報を発表できるような解説資料のあり方を検討している。

そのような解説資料には、基本的に潮位・波浪の実況の解説、ガイダンスと実況のずれの解説、ガイダンスの修正の考え方等を記述することが望ましい。しかし、ガイダンスをどの程度（量的に）

\* A Fundamental Research on Characteristics of Coastal Waves around Japan and the prospects for Numerical Prediction Wave Model

\*\*1 Hitoshi Takeuchi, Nadao Kohno, Ayako Yamane

Office of Marine Prediction, Global Environment and Marine Department (地球環境・海洋部海洋気象情報室)

\*\*2 Satoko Matsueda

Climate Prediction Division, Global Environment and Marine Department (地球環境・海洋部気候情報課)

\*\*3 Taishi Itakura

Maritime Division, Hakodate Marine Observatory (函館海洋気象台海上気象課)

\*\*4 Tadayoshi Utsunomiya

Maritime Division, Maizuru Marine Observatory (舞鶴海洋気象台海上気象課)

\*\*5 Hideki Kaneko

Maritime Division, Kobe Marine Observatory (神戸海洋気象台海上気象課)

\*\*6 Yasuyuki Nagaya

Maritime Division, Nagasaki Marine Observatory (長崎海洋気象台海上気象課)

現所属 ※ 福江空港出張所

修正すべきかについては、補正するための知見や技術などがまだ不十分であり、客観的な補正方法の確立が喫緊の課題である。

本稿では、平成 22 年度海洋気象技術検討会において行った的確な警報・注意報、潮位情報等の発表に資する解説資料作成に向けての基礎的な調査・検討のうち、「波浪ガイダンスの特性調査と補正方法の検討」の結果を踏まえ、沿岸防災業務強化に資するための日本周辺海域における波浪特性に関する基礎調査の結果と、あわせてそれに関係の深い波浪モデルの現状と今後の展望を取りまとめた。

なお、以下は基本的に日本標準時 (JST) で表記しているが、モデルの初期値については世界標準時 (UTC) で表記した。

## 2. 波浪モデルと解説資料の概要

現在、波浪モデル格子点値 (GPV) は波浪ガイダンスとして予報作業支援システム (以下、YSS2) とアデス統合ビューワに配信され、気象官署が発表する波浪警報・注意報、波浪予報のための根幹的な資料となっている。解説資料としては、波浪ガイダンスを補足し、予報や警報などが的確に発表されることを目的として、具体的には「実況に関する留意点」、「今後の見通しに関する注意点」、「予測モデル結果やガイダンスの解釈・変更点」などを考慮する必要がある。特に波浪モデルをどのように解釈するかが重要であることから、最初に波浪モデルの現状と今後の展望及びあるべき解説資料の概要について述べる。

### 2.1 波浪モデルの現状と今後の展望

波浪情報には波浪モデルの予測値が不可欠である。海洋気象情報室ではこれまでも折に触れて、波浪モデルについて解説をしてきているが、改めて気象庁の波浪モデルの現状について概要をまとめておく。

#### 2.1.1 波浪モデルの概要

気象庁では第 1 表に示すように、極域を除くほぼ全海域 (75° S ~ 75° N) を対象とした「全球波浪モデル」と、日本近海・沿岸海域を対象と

した「沿岸波浪モデル」の 2 つの数値波浪モデルを運用している。これらは、気象研究所で独自に開発した第 3 世代波浪モデル MRI- III である。モデルの詳細については Ueno and Kohno(2004) を参照されたい。

全球波浪モデルは、日本域を対象とした通常の予報作業には余り用いられないが、主に外洋域を航行する外航船舶向けの波浪情報や、うねり伝播の評価にとって重要なものである。気象庁を含む世界の気象機関は、世界気象機関/ユネスコ政府間海洋学委員会合同海洋・海上気象専門委員会 (JCOMM : WMO/IOC Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology) の枠組みにおいて全球波浪モデルの精度に関する国際比較を行っている。国際比較の結果は海洋気象情報室波浪班イントラホームページ (以下、イントラ HP) 上に、掲載している。気象庁の全球波浪モデルの精度は、周期を除き、世界的な順位が低下傾向にあり、特に初期値の改善が急務となっている。

沿岸波浪モデルは、日本近海を対象とした高解像度のモデルで、全球波浪モデルでは表現されない島や半島などによる遮蔽の効果を考慮できる。なお、海岸近くは水深が浅いところへ波が到達すると変形する (浅海効果) が、日本の沿岸は全般的に水深が比較的深く、沿岸波浪モデルの解像度でもこの効果が現れる範囲はごく狭い地域しかないので、全球・沿岸の両モデルともこの効果は考慮していない。このほか潮流や海流なども波浪に影響を与えうるが、相互作用などが含まれて複雑になるので、これらの影響についても現在は含まれていない。

沿岸波浪モデルの精度については吉田ほか (2012) が体系的な調査を行っており、最新の統計結果については、前述イントラ HP に掲載してある。

このほか、気象庁では、国土交通省水管理・国土保全局 (旧河川局) との連携の一環で、一部の内海・内湾を対象に「浅海波浪モデル」を試験運用中である。このモデルは、波浪モデル WAM (詳細は The WAMDI Group(1988) 参照) をベースに、国土技術総合政策研究所が開発したものであ

る。浅海波浪モデルは、1分メッシュ（約2km弱）という高解像度で詳細な地形と港湾を表現し、浅海効果も考慮されている。平成20年から東京湾、伊勢湾、大阪湾、播磨灘、有明海の5海域を対象に試験運用を開始し、平成23年9月1日03UTCからは仙台湾と新潟沖が追加され、現在7海域を対象としている。予測結果はYSS2にも配信されて、庁内で参照・利用が可能であり、その精度評価の結果についても、波浪班イントラHPに最新の統計結果を掲載してある。

なお、波浪モデルの予測計算には、波浪を発生させる外力として海上風（正確には摩擦速度）が

必要となり、波浪の予測精度は、海上風の予測精度にも依存している。また、全球波浪モデル・沿岸波浪モデルとも全球数値予報モデル（以下、GSM）の風応力を用いて計算しており、台風域内については、解析・予報された台風の位置と強度から想定される仮想的な傾度風を算出し、補正を行っている。浅海波浪モデルの予測値は高解像度かつ浅海効果を含んでいるので、波浪のより詳細な表現が可能であるが、1分メッシュといえども波浪の局所的な高まりを必ずしも表現できないこと、メソ数値予報モデル（MSM）の風を用いているので、GSMの風による沿岸波浪モデルと

第1表 気象庁で運用している波浪モデル

	全球波浪モデル	沿岸波浪モデル
タイプ	MRI-III（第3世代波浪モデル）	
計算領域	地球のほぼ全海域 75° S~75° N 180° W~0° ~180° E (全周)	日本近海・沿岸 20° N~50° N 120° E~150° E
格子数	720×301	601×601
格子間隔	緯経度0.5度	緯経度0.05度
スペクトル成分	900成分（25周波数×36方位） 周波数成分：0.0375~0.3Hz；対数分割 方位成分：10度間隔	
外力	全球モデルGSM（20km格子） 台風域内は仮想的な傾度風で補正（72時間先まで）	
予測時間 (12UTC) (00/06/18UTC)	216時間 84時間	84時間 84時間

浅海波浪モデル						
タイプ	WAMベース（第3世代波浪モデル）					
	東京湾	伊勢湾	播磨灘・大阪湾	有明海	仙台湾	新潟沖
計算領域	35.05° N~ 35.75° N 139.55° E~ 140.15° E	34.35° N~ 35.05° N 136.45° E~ 137.45° E	34.05° N~ 34.85° N 134.15° E~ 135.45° E	32.45° N~ 33.25° N 130.05° E~ 130.75° E	37.75° N~ 38.45° N 140.90° E~ 141.50° E	37.80° N~ 38.40° N 138.35° E~ 139.25° E
格子数	37×43	61×43	79×49	43×49	37×43	55×37
格子間隔	緯経度1分					
スペクトル成分	1260成分（35周波数×36方位） 周波数成分：0.0418~1.1Hz；対数分割 方位成分：10度間隔					
外力	メソ気象モデルMSM（5km格子） 台風域内は仮想的な傾度風で補正					
予測時間 (03/09/15/21UTC)	33時間					

違いが出る点がある点が必要である。台風が発生している場合は、台風予報円の円周上の4点を台風が通ったとした、右端・左端・最速・最遅4コースの場合についても、台風による仮想的な風を作成して計算を行い、台風の進路に応じた予報ができるようにしている。

### 2.1.2 波浪モデルの開発課題

気象庁では、平成24年度(2012年度)にスーパーコンピュータシステム(NAPS)の更新を予定している。次期NAPS(NAPS9)における波浪モデル関連の開発課題について、簡単に概要を紹介する。

#### 2.1.2.1 データ同化の導入

波浪モデルでは、初期値を作成する際に、観測値を参照した補正(データ同化)は行っていない。波浪の観測地点自体が少ないうえに、観測値は有義波高などの統計量が主で、モデルの予報変数である波浪2次元スペクトルの観測は非常に少ないので、観測値から初期値を作ることが難しいためである。そこで、波浪モデルでは、該当初期時刻より遡り、気象モデルの風(解析値)を用いて、波浪(スペクトル)を計算することにより初期状態を得ている。このような方法を、予測(Forecast)に対比させて追算(Hindcast)と言う。

気象庁では、極軌道衛星による大量の波浪観測値が安定的に利用できるようになったことから、ここ数年にわたり、波浪の客観解析システム及び波浪データ同化手法の開発を進めてきた。基本的な開発は終了し、精度の向上が確認できたので(Kohno *et al.*, 2011; 吉田ほか, 2012)、NAPS9への更新後にデータ同化システムを導入する予定である。

#### 2.1.2.2 沿岸における浅海波浪モデルの展開

気象庁の波浪情報は海岸から20海里を対象とし、海岸部における局所的な浅水変形は、従来のモデルでは考慮してこなかった。しかし、近年海岸での波浪災害が頻発し、沿岸住民や海岸利用者向けの防災情報として、海岸部の詳細な波浪情報の重要性が高まってきている。このため、気象庁

の波浪モデルに浅海効果を導入し、波浪予測精度向上を図る計画である。

#### 2.1.2.3 波浪アンサンブル予測

波浪は、時間的・空間的に非常にスケールの小さな現象であり、台風や低気圧などのわずかな予測の違いにも強く影響を受けて予測結果が変化する。外航船舶の航行等には、週間スケールの予測情報が必要であり、予報部は、週間予報に風・波浪の情報を追加することを検討している。しかし、5日先の予想では、気象の予測精度が低下するため、波浪を決定論的に予測することは難しく、アンサンブル予測による確率予測情報の提供が必要である。また、世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)では、荒天予報実証プロジェクト(SWFDP: Severe Weather Forecast Demonstration Project)という、悪天候についての早期警戒情報の提供を行うシステムの構築を進めており、この一環として波浪についても同様の情報提供が求められている。

以上の国内外の動向を踏まえ、NAPS9では、波浪アンサンブル予測を行い、週間予報を想定した波浪確率予測情報の提供を計画している。

#### 2.1.2.4 波浪情報の高度化

気象庁の発表する波浪情報では、海域ごとに最大の有義波高を発表している。現在、波浪情報のニーズは多様化してきており、よりの確かな防災情報を提供するため、以下の2点の高度化を計画している。

##### (1) 航行等に支障の生じやすい危険海域の特定

近年の船舶災害では、いわゆる三角波等のいわゆる「一発大波」の影響に関心が集まっている。学術的にも異常波浪(freak wave; 有義波高の2倍を超える波のこと)のメカニズムとして、流れの影響などについて研究が行われている。これらの波を予測することはまだ難しいが、波浪スペクトルを活用し、また海流の場等を考慮することにより、航行等に支障の出やすい危険な海域を特定することは可能である。このような「危険海域」の特定と注意喚起に向けた開発を進めていく予定である。



## (2) 沿岸への波浪の影響の評価

近年発生した海岸部における波浪災害では、波高が大きいだけでなく長周期の波によるものがあることも着目されている。一般的に、長周期の波は短周期の波よりも海水の運動が大きいことから、海岸構造物に影響を与えやすく、海岸に波が打ち上がりやすくなり、人も波にさらわれやすい。気象庁の波浪情報は、波高を基準に発表されているが、より幅広い防災に資するため、周期等も考慮して沿岸における影響を総合的に評価する手法を開発する計画である。

### 2.2 解説資料の概要

解説資料は、波浪や潮位など沿岸防災に関する予報作業や警報・注意報発表作業を支援することを目的としている。提供頻度は原則として1日2回（午前と午後に1回ずつ）とする。ただし、新たな予測資料等による情報があれば、修正を加えて再度提供するほか、必要に応じて臨時に情報を提供する。

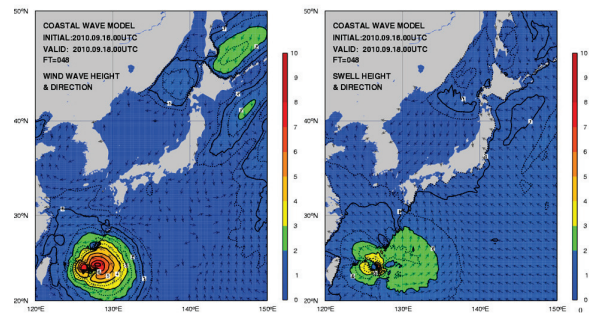
#### 2.2.1 波浪に関する解説資料

午前の波浪に関する解説資料は、その主目的を実況の監視とし、対象期間を当日夜までとする。内容としては、波浪警報・波浪注意報クラスの波があるかどうかに関するコメントや、高波についてその要因を解説する。可能であれば、実況とモデルとのずれやその理由及び見通しについて言及する。様式は担当海域の09時の実況を示すマップと説明文からなる。

午後の波浪に関する解説資料は、対象期間を原則翌日までとする。内容としては、沿岸海域ごとのモデルでの有義波高の最大値を示し、更に風浪とうねりに分離してそれぞれの波高の最大値を示す。有義波高については具体的な修正量を示す。コメントとして、実況とモデルとのずれやその理由に言及する。様式は担当海域について、時系列（バーチャート）形式と箇条書きのコメントを考えている。

#### 2.2.2 台風臨時解説資料

台風の中心付近の高波高域では、うねりに比



第1図 台風中心付近の風浪とうねり（T1011の例）  
左：風浪 右：うねり

べて風浪の占める割合が大きい（第1図）。一方、そこでの風の状況は、台風予測（進路・強度）によることから、風浪についての情報提供は風の状況に合わせ即時的統一的に行う必要がある。臨時解説資料の内容としては、風浪に対する評価及びモデル計算結果からの修正（量的見積り）が主となる。

### 3. 事例調査と解説資料の検討

平成22年度海洋気象技術検討会においては、沿岸防災解説資料の品質向上のために、波浪モデルの特性について把握することを主なテーマとした。そのため、各海洋気象台がその担当海域において波浪モデルの予測誤差（「予測値－観測値」のこと、以下、誤差）が大きかった事例を対象として、その誤差の原因について考察を行い、それぞれ検討を行った。その後平成23年4月にモデルの一部変更を実施したことから、ここでは誤差自体を評価するのではなく、誤差を引き起こした現象そのもののメカニズムを把握することを目指し、事例についての詳細な調査をまとめた。その際、あわせて事例発生時の実況資料をもとに解説資料を作成し、現象の推移を詳しく把握する一方で、その過程で注目すべき実況資料は何かといった点について検討した。

事例解析では、気象庁沿岸波浪計データ、港湾局波浪計データ（ナウファス：全国港湾海洋波浪情報網：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS 国土交通省港湾局、各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局、国土技術政策総合研究所及び独立

行政法人港湾空港技術研究所の相互協力のもとに構築・運営されている我が国沿岸の波浪情報網：を通じて取得したデータのこと、沿岸の地上気象観測とアメダスの風データ及び衛星資料による風データ等を利用した。欧州宇宙機関の衛星 MetOp-A に搭載の改良型散乱計 (Advanced Scatterometer) を利用した場合はその海上風の解析図も含めて ASCAT, アメリカ航空宇宙局ジェット推進研究所 (NASA/JPL) の地球観測衛星 QuikSCAT (2011 年時点では運用終了) を利用した場合はその海上風の解析図も含めて QuikSCAT と表記する。なお、衛星資料・地上天気図・全球数値モデル (以下、その海上風の解析図も含めて GSM) の風速データは knot 単位で、アメダス観測値は m/s 単位で示す (1knot=0.5144m/s)。また、予測値としては GSM と沿岸波浪モデルの 3 時間ごとのデータ (風向, 風速, 有義波高等) を利用したが、第 2.1.1 項で述べたように波浪モデルの海上風には GSM が使用されていることを付記する。

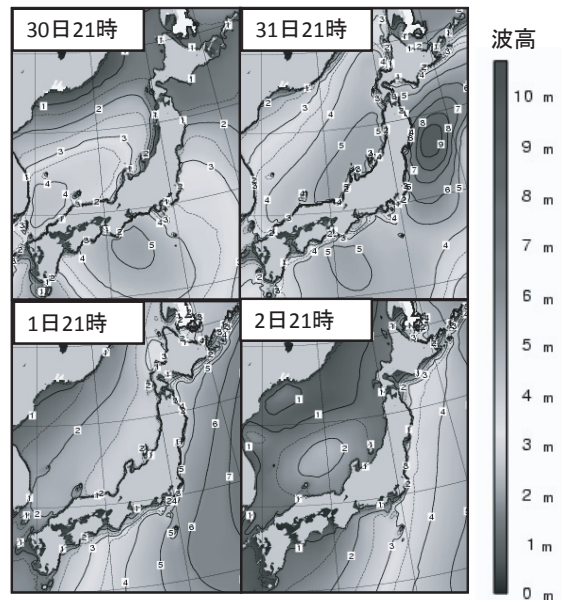
### 3.1 三陸沖で発達した低気圧による関東近海における高波の事例

#### 3.1.1 気象と波浪の概況

2009 年 1 月 30 日 09 時に九州付近にあった低気圧は、本州の南海上を東北東進し、31 日 09 時には房総半島付近に達した (第 2 図)。この低気圧は発達しながら 2 月 1 日 09 時には日本の東海上に達し、本州付近は冬型の気圧配置が強まった。その後、低気圧は急速に発達し、2 日 09 時には

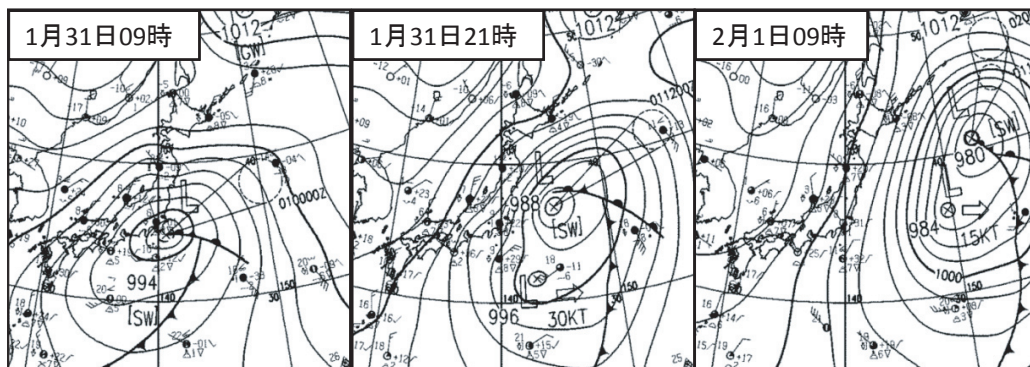
千島の東に達した。一方、日本付近は北海道を除き移動性高気圧に広く覆われた (図省略)。

第 3 図に沿岸波浪図を示し、波浪の概況について述べる。低気圧の接近に伴い北日本から関東地方の太平洋側を中心に 30 日から 31 日にかけては波が発達する場となった。31 日朝に低気圧が日本の東海上へ抜けた後、北北東風が次第に強まり、31 日夜には三陸沖で最大 9 m の波高が解析されている。その後、低気圧は日本から次第に遠ざかったが、北日本～関東地方の太平洋沿岸では波が高い状態が続いた。



第 3 図 沿岸波浪図

1 月 30 日～2 月 2 日の 21 時の日本沿岸の波浪の状況を示す。



第 2 図 地上天気図

左：2009 年 1 月 31 日 09 時，中：1 月 31 日 21 時，右：2 月 1 日 09 時

### 3.1.2 実況と波浪モデルの比較

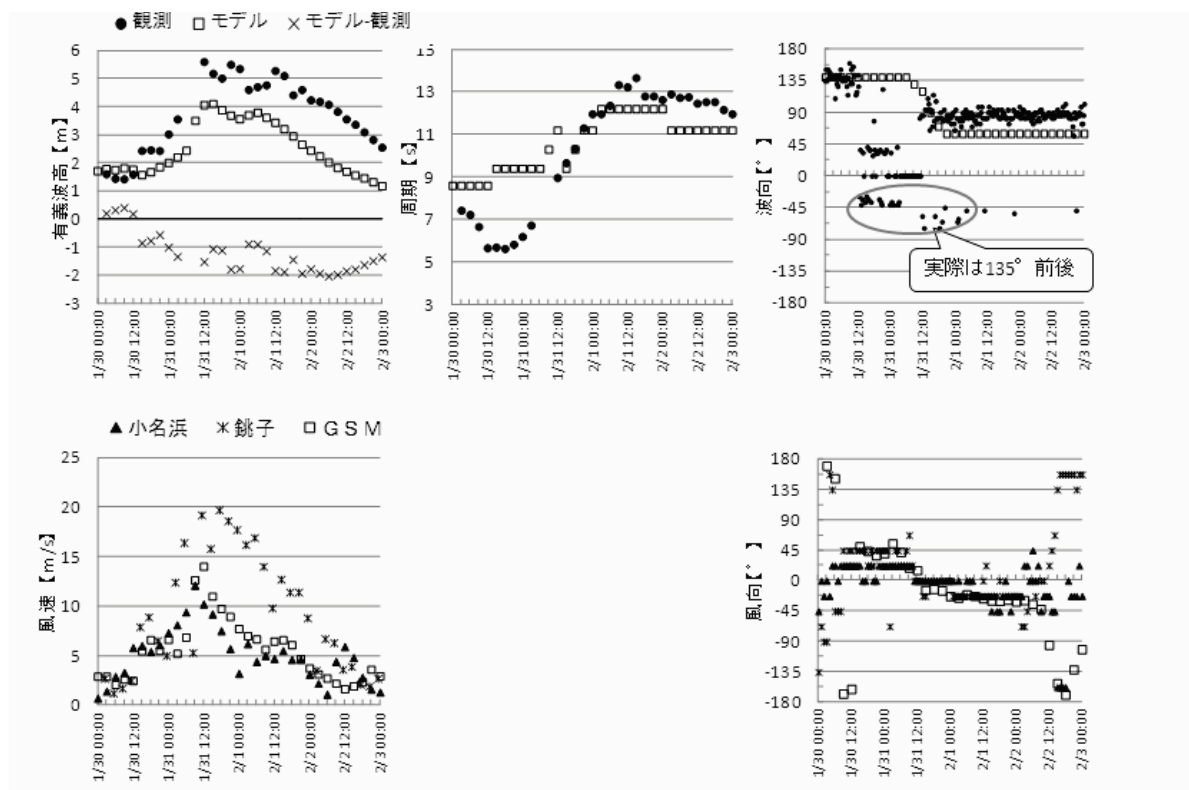
常陸那珂付近の波浪及び風の観測値とモデルの予測値を比較したものを第4図に示す。モデルの予測値が3時間ごとであるため、観測値も3時間ごとの値を用いた。3時間ごとの観測値は、波高及び周期については該当時刻及び該当時刻前後の合計3つの20分値の平均値とした。波向については20分値をそのまま用いた。また、14時30分発表の「波浪に関する地方解説資料」を想定し、モデルの予測値はFT=24、27の常陸那珂に直近のGPVを使用した。

波高の時間変化に注目すると、実況（観測値）、モデルともに31日の日中、1日の日中にピークがあり、そのタイミングはおおむね一致している。しかし、波高は、期間を通じて実況がモデルより高い。

30日の午前中は実況とモデルはおおむね一致している。その後、31日昼頃にかけて、実況で

は風浪の発達により波高が高まったが、モデルでは実況に比べ波高の上昇が遅い。実況では31日12時に波高が最大となっており（5.6 m）、モデルとの差は1.5 mとなっている。この期間の実況の波向を見ると、北～北東、及び南東の2種類の波が観測されている。一方、モデルの波浪スペクトルを見ると、南東からの波は十分に表現されていたが、北～北東からの波は余り表現されていない（第5図）。その後、1日未明にかけて実況、モデルともに波高が下がった。

1日昼頃にかけては波高が再度上昇したが、その後は次第に下降していった。この期間、海上風が弱まり波高も低下したが、周期は13秒前後が続いており、うねりが卓越していたと考えられる。このうねりに対するモデルの予測は過小であり、モデルの誤差は1日12時で1.8 mとなり、2日昼頃にかけて2 m前後の差が続いた。

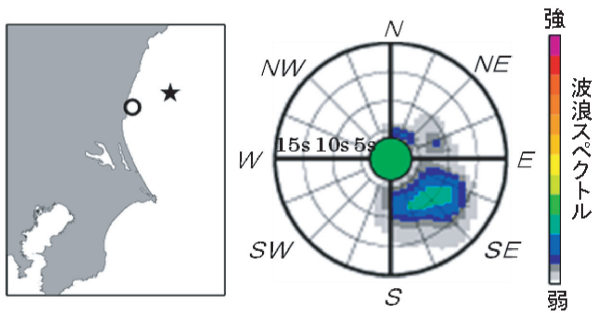


第4図 常陸那珂付近の観測値と予測値の比較

上段：常陸那珂の観測値とモデルの予測値の比較。常陸那珂では北西からの波は捉えにくいいため、実際の波向は、観測された波向とは反対の向きであると考えられる。

下段：小名浜と銚子の風（地上気象観測）と常陸那珂でのGSMの海上風の比較。



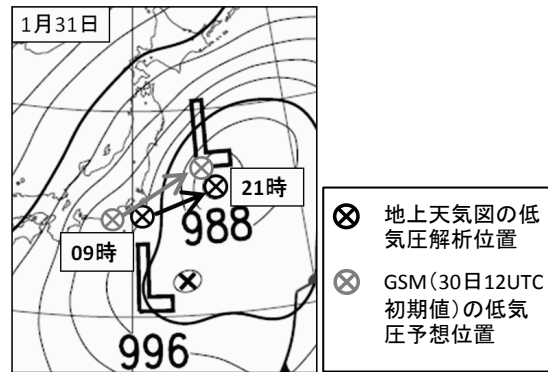


第 5 図 常陸那珂付近のモデルの波浪スペクトル  
29 日 12UTC 初期値の FT=27 (31 日 00 時) の波浪スペクトル。  
左図の丸印が常陸那珂港湾局波浪計の位置，星印が波浪スペクトルの位置を表す。

### 3.1.3 誤差の要因についての考察

期間前半 (2009 年 1 月 30 日から 1 月 31 日昼) については、波向は前述のとおり、モデルで南東が卓越しているのに対し、実況では南東と北～北東の 2 つの波向が混在していた。南東からの波は、低気圧前面の南東風による風浪とそれを波源とするうねりであり、北～北東からの波は低気圧の北西象限で発生した風浪と考えられる。31 日 12 時、常陸那珂で波高 4.1m の予測であったのに対し、実況は 5.6 m であった。以下、風浪とうねりそれぞれについて誤差の要因について考察した。

31 日 09 時と 21 時における地上天気図の低気圧の解析位置と GSM の低気圧の予想位置を第 6 図に示す。低気圧の中心気圧は解析と GSM ではほぼ一致しており、風浪発達の原因として、低気圧の位置についての解析と GSM の予測の違いに注目した。第 6 図から、低気圧は GSM の予想よりも東海上へ抜けるタイミングが早く、かつ南東側の経路を進んだことがわかる。このため、関東近海では北～北東風の吹き始めるタイミングが早まり、かつ GSM の予想より南側まで北～北東風となったと考えられる。小名浜と銚子の地上気象観測では、GSM に比べて風向が北～北東に変わるタイミングが早く、31 日午前中に風が強まるタイミングも早くなっていた (第 4 図)。このため、茨城県沿岸では北～北東風の吹続時間が約 12 時間長くなり、風浪の発達が促されたと考えられる。ここで低気圧の進路と速さの違いをもとに、



第 6 図 31 日 09 時と 21 時における GSM と解析の低気圧中心位置の比較  
地上天気図は、31 日 21 時のものである。

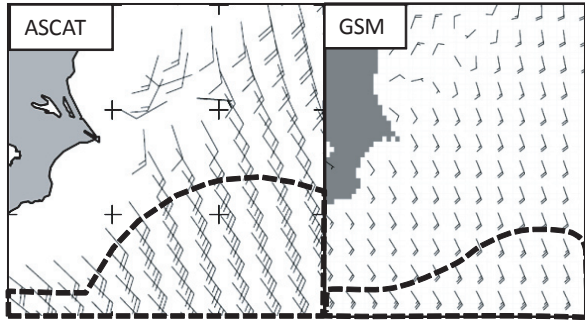
SMB 法を利用して波高値を見積もる。31 日 12 時での北～北東風による風浪を推算してみると、モデルの波高は 3 m 前後であり、風速 30 knot と仮定すると吹続時間は 9 時間必要となる。一方、実況の波高を、風速 20 knot で吹続時間 12 時間の後、風速 30 knot で吹続時間 9 時間として推算すると 3.5 m となり、モデルより 0.5 m 程度高かったと推測される。

次に、南東からの風浪及びうねりに注目する。第 7 図に 30 日 21 時頃、ASCAT で観測された海上風と同時刻頃のモデルが予測した海上風を示す。実況ではモデルに比べ風上側の南東風が 5 knot 程度強く、風向も東成分が大きいことから、南東からのうねりがモデルより 0.5 ~ 1 m 程度高い 4 m 前後となったと考えられる。したがって、上述の風浪 3.5m とうねり 4m の合成波高は 5.3m となり、観測値とほぼ一致する。

期間後半 (2009 年 1 月 31 日昼以降) については、31 日夜に三陸沖南部で発達した風浪を波源とするうねりが卓越していた。波高が最大となった三陸沖南部における風浪とその風浪を波源として下流に伝播したうねりに注目して考察した。

三陸沖南部では 31 日夜にかけて北北東風による風浪が高まった。この海域の海上風は、GSM では 50 ~ 55 knot の予想であった (第 8 図)。一方、実況では 31 日 18 時頃に QuikSCAT が福島県沖で 50 ~ 60 knot の北北東風を観測しており、21 時頃には ASCAT が岩手県沖で 45 knot の北北東

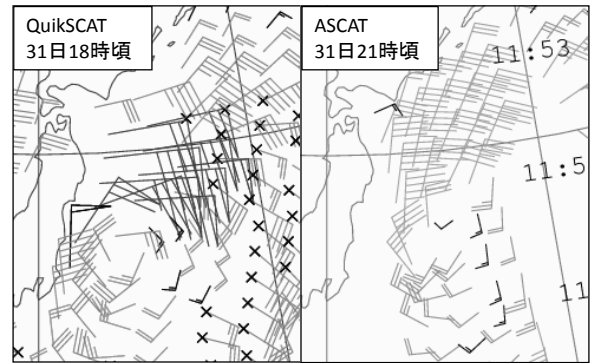




第7図 30日21時11分頃の実況とGSMの海上風 [knot]

左: ASCAT, 右: GSM (30日00UTC初期値のFT=12)

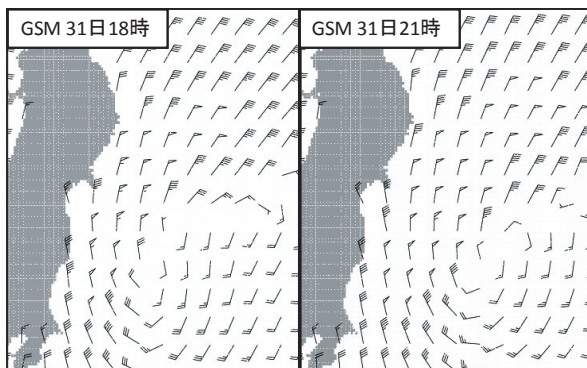
破線の枠内は風速25knotの領域を表す。



第9図 衛星で観測された海上風 [knot]

左: QuikSCAT (31日17時57分～18時01分頃)

右: ASCAT (31日20時50分～20時53分頃)



第8図 31日18時と21時のGSMの海上風 [knot]

左: 31日18時 (30日12UTC初期値のFT=21)

右: 31日21時 (30日12UTC初期値のFT=24)

風を観測した(第9図)。沿岸の地上気象観測やアメダスでも北北東の強風を捉えており、31日の日中、宮城県江ノ島ではモデルより5knot程度強い55～60knotが観測された。このことから、実況の海上風がモデルより5knot程度強かったと推察され、実況の波高もモデルより高かったと考えられる。31日21時の三陸沖南部の波高を推定してみると、31日09時には北北東風による風浪はモデルより高く5m前後で、南東からの3～4mのうねりが重なり合成波高は6m前後となった後、風速55knot、吹続時間10～12時間として風浪を見積もると最大波高は9m台半ば、周期は約12秒となる。この値はモデルの予測より1.5m高くなった。この結果、茨城県沿岸に到達したうねりがモデルより高くなったと推察される。し

たがって、波源となる風浪の波高を把握できれば、その後のうねりについて事前にモデルの上方修正が可能であったと考えられる。

以上を踏まえて、茨城県沿岸を対象とする2月1日14時30分発表の「波浪に関する地方解説資料」作成の際の着眼点は次のとおりとなる。

31日夜の衛星観測(第9図)から、三陸沖の北北東風がGSMの予測値(第8図)より5knot程度強かったことがわかる。SMB法により波源付近の波高を推算すると(前述)、モデルより1.5m程度高い値となる。上流にあたる宮城県沖GPSブイではモデルより1.5～2m高い波高6m前後、周期12秒が観測されており、推算は妥当であると言える。常陸那珂でも波高が次第に高まり、周期も伸び、1日12時には5m台半ば、周期13秒が観測されている。31日21時から15時間後であり、周期、うねりの伝播距離(270海里)、風向を考慮すると、このうねりの波源は三陸沖南部の最大波高域(9m台半ば)より上流側の波高7～8m前後、周期11秒の風浪と考えられる。第10図から、この海域では茨城県沿岸～沖合を指向する風が吹いていたことが確認できる。波源を8mとし、海上風から推定されるうねりの主方向と常陸那珂の角度差20度程度を考慮して1日12時頃に常陸那珂に伝播するうねりを推算する。角伝播係数は第11図より0.95となり、うねり波高は以下のように求められる。

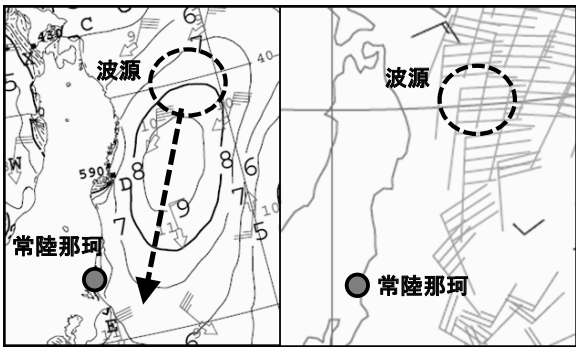
$$\text{うねり波高} = 8.0 \text{ m} \times 0.77 (\text{うねりの減衰率}) \times 0.95 (\text{角伝播係数}) = 5.9 \text{ m} (\text{周期} 12 \text{ 秒})$$

推算した値は、常陸那珂で12時頃に観測された波高5m 台半ば（12時40分では5.7 m）、周期13秒とおおむね一致する。以上のことから、1日夜にかけてモデルより1.5～2 m 高めの修正についての言及が可能であると考えられる。この修正量は、実際のモデルの誤差におおむね一致する。

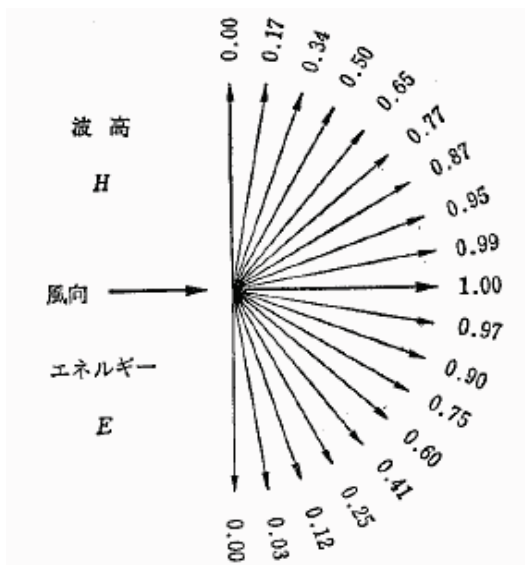
また、1日09時の客観解析のモデル修正量を見ると、上流にあたる北日本の太平洋側で1～1.5 m の上方修正となっている（第12図）。前日の夜の三陸沖の海上風の実況や、宮城中部沖GPS ブイや常陸那珂の実況を踏まえると、この

修正量は妥当と考えられる。したがって、上流での修正量を参考に、2日の前半はモデル+1～1.5 m の修正、後半は低気圧の移動とともにうねりの波源も遠ざかるため、うねりの影響は小さくなると考えモデル+1 m の修正についてコメントが可能と考えられるが、実際には、2日のモデルの誤差は2m 前後となっており、修正量は十分ではない。この差については、1日09時以降も波源域の波高がモデルより高く推移したこと及び、モデルがうねりを減衰させ過ぎる特性が影響したと考えられる。

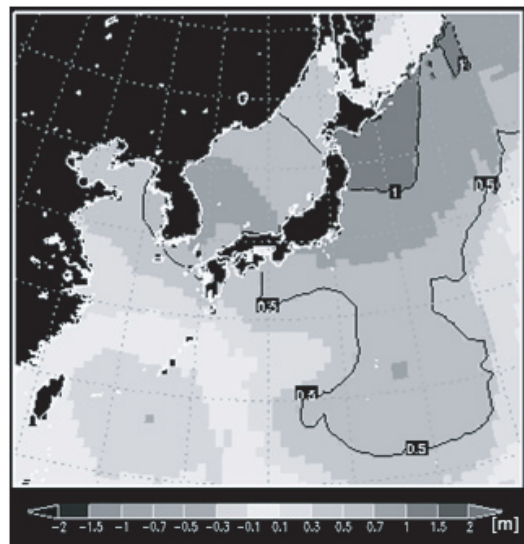
以上をまとめると、茨城県沿岸では低気圧の接近により北東風による風浪及び南東からのうねりが混在する場となり、その後、低気圧は発達しながら三陸沖に達し、そこで発達した風浪を波源とするうねりが茨城県沿岸に到達した。モデルでは三陸沖からのうねりが過小評価となっていたが、再解析の結果、実況の風の資料から波源域での風浪の発達程度が把握できれば、「波浪に関する地方解説資料」でうねりの上方修正についての言及が可能であることがわかった。ただし、波源となる風浪が発達中であったため、翌日についての言及可能なモデルの修正量は、実際のモデルの誤差



第10図 常陸那珂に伝播するうねりの波源  
 左：31日21時の沿岸波浪図、右：31日21時頃にASCATで観測された海上風  
 矢印は、波源からのうねりが伝播する主方向を表す。



第11図 角分散による波高とエネルギーの分布  
 淵ほか（1976）より引用。



第12図 2月1日09時の客観解析によるモデルの修正量 [m]  
 北日本の太平洋側で+1m 以上の修正となっていることが分かる。

に比べると十分ではなかった。このような発達中の風浪が波源である事例については事例調査を蓄積し、モデルの修正手法について検討する必要がある。

### 3.2 四国の南海上に停滞した低気圧による高波の事例

#### 3.2.1 気象と波浪の概況

第13図に2009年5月27～29日の09時の地上天気図を示す。5月27日に沖縄の南東海上にあった低気圧は発達しながら北東進し、5月28日には四国の南海上に達した。その後低気圧の動きは急速に遅くなり、5月29日にかけて四国の南海上でほとんど停滞した。この期間、低気圧の北側で等圧線の間隔が狭くなっていた。

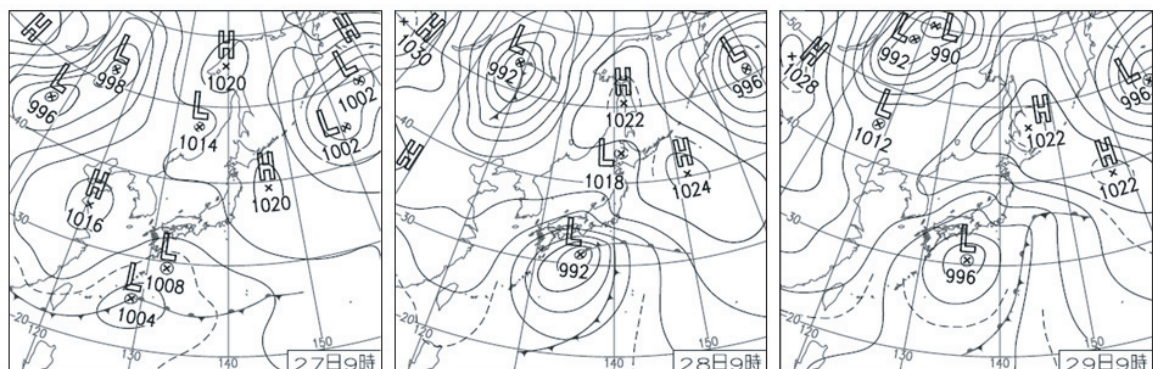
第14図は同期間の09時と21時の沿岸波浪図である。27日09時四国沖の波高は3～4mであったが、27日21時には5～6m、28日09時には7～8mと次第に高くなり、28日21時には9～10mに達して波高のピークとなった。その後急速に下がって、29日09時は4～5m、29日21時は3～4mとなった。

#### 3.2.2 実況と予想との比較

本事例は、四国の南海上に停滞した低気圧による高波の際に、四国地方整備局により高知西部海域に設置された高知西部沖GPS波浪計（以下、高知西部沖ブイ）で観測された波高値がモデルに

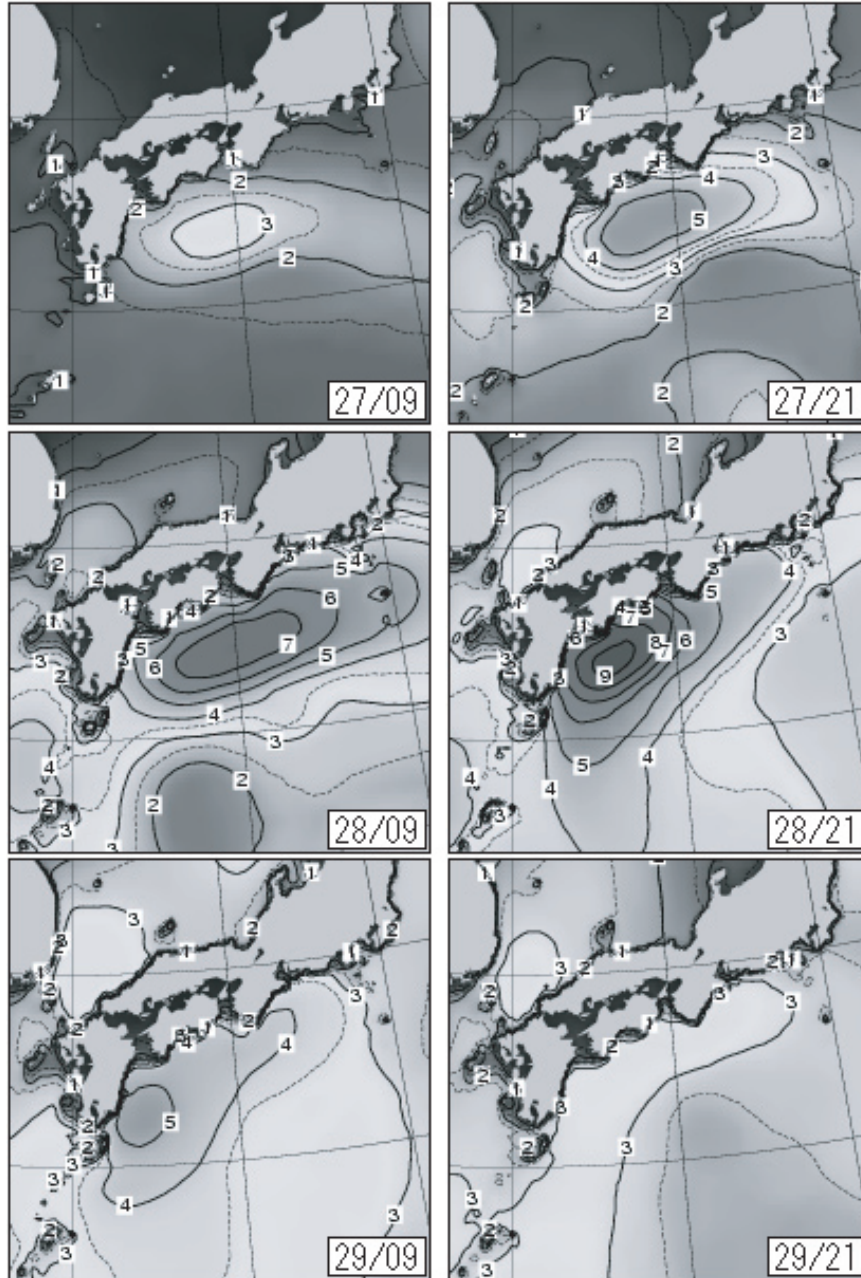
比べ4m以上も高かったケースである。第15図に高知西部沖ブイの位置を示す。第16図は、高知西部沖ブイの2009年5月27～29日にかけての波浪と海上風の経過と当ブイの緯度経度に対応するモデル格子点での予測値、及び誤差を表した図である。波高は、5月27日午前まではおおむねモデル並みに経過し誤差も小さかったが、27日午後からモデルの予想より大きく波高は上昇して誤差も大きくなり、5月28日06時に波高7.6m、誤差は-3.2mで1回目のピークとなった。ピーク後、波高の下降に伴い誤差も縮小したが、28日午後からモデルの予想より大きく波高は上昇して誤差は再び拡大し、28日18時に波高9.5m、誤差は-4.6m（予測値は4.9mで観測値は予測値のおよそ2倍）と2回目のピークとなった。その後波高が急下降したのに伴い誤差も縮小し、5月29日夜には波高はモデル並みとなり、誤差はほぼ解消した。風速は、5月27日24時まではおおむねモデル並みに経過したが、5月28日03時以降は28日18時を除きモデルより5～10knot弱く経過した。

高知西部沖ブイで観測された2回の波高ピーク時における九州東岸から東海沿岸の波浪観測点での波高の分布を第17図に示す。両ピーク時も高知西部沖ブイの波高・モデルとの差がほかの波浪観測点よりも突出して大きくなっており、本事例は高知西部海域に局所的に発現した現象であった。



第13図 地上天気図  
2009年5月27～29日の09時の地上天気図





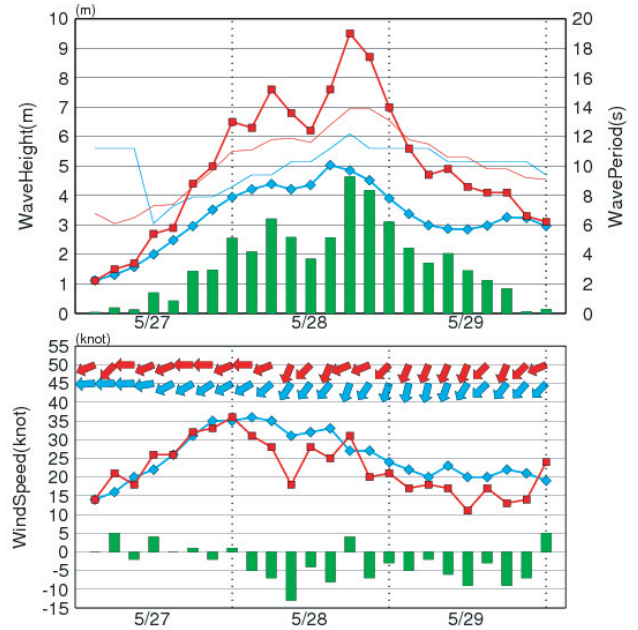
第14図 沿岸波浪図

2009年5月27～29日の09時と21時. 図の右下の数字は日/時を表す.

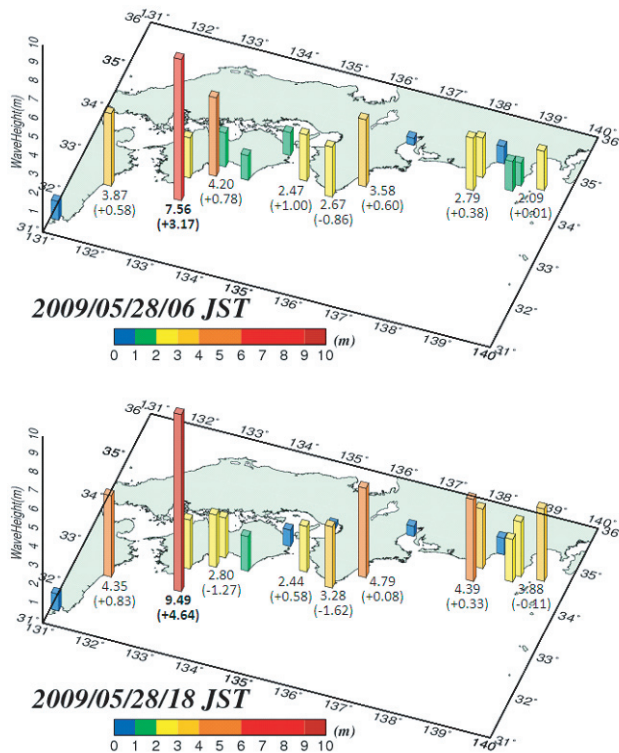




第15図 高知西部沖ブイの位置図  
高知県足摺岬の南東約16km 沖合に設置されている。



第16図 5月27～29日の3時間ごとの高知西部沖ブイの波浪(上段)と海上風(下段)の経過図  
波浪経過図の太線は波高, 細線は周期を, 海上風経過図の実線は風速, 矢印は風向を表す. また, 観測値を赤色, 予測値を水色, 予測誤差(予測値 - 観測値)の正負を逆にしたものを緑色で表す.



第17図 5月28日06時(a)と18時(b)の各波浪観測地点の波高分布図  
主な波浪観測点には波高とモデルとの差(カッコ数字, +はモデルより高いことを, -はモデルより低いことを意味する)を付加した. 太字が高知西部沖ブイである.

### 3.2.3 誤差の要因についての考察

高知西部海域で大きな誤差を引き起こした要因となる現象について考察した。高知西部沖グイでの風速と波高の経過に着目すると、次に挙げる3つの特徴がみられた。

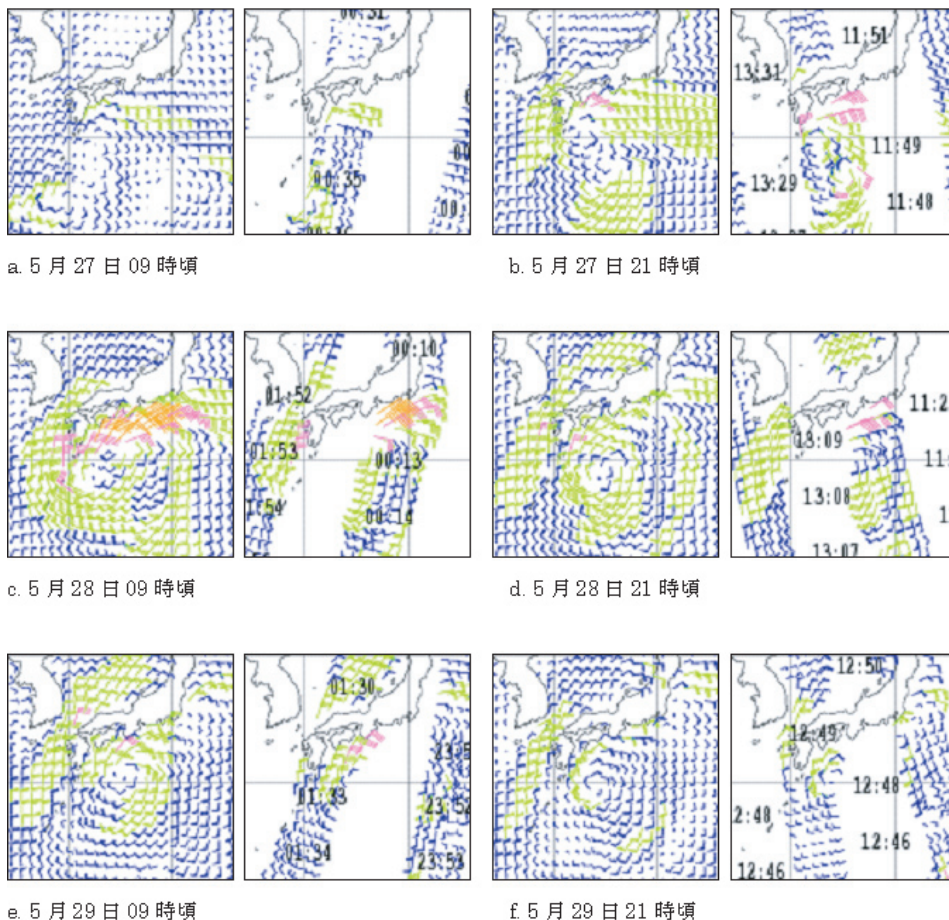
- ① 5月27日18～24時にかけて風速はほぼモデル並みに経過していたが、波高はモデルの予想よりも大きく上昇した。
- ② 5月28日3～6時にかけて風速は下降傾向となりモデルより5knot程度弱く経過したが、波高は上昇が続き、06時に1回目のピークとなった。
- ③ 5月28日12～15時にかけて風速は②と同じような傾向となったが、波高は再び上昇して18時に2回目のピークとなった。

①～③から、3m、4mを超える大きな誤差の要

因は、風浪が予想より発達したことによって発現したのではなく、予想とは異なる方向・波高のうねりが高知西部海域に到達したためと考えられる。また、高知西部海域は黒潮の流路にあたり、波向が東よりの時に海流の影響によるとみられる予想より波高の大きい波が観測されることがある。本事例では四国の南海上で低気圧がほとんど停滞したことにより低気圧の北側にあたる四国太平洋沿岸から東海道沿岸にかけて北東から東北東の風が持続しており、海流の影響により誤差が更に大きくなった可能性もある。以下、本事例における誤差の要因と考えられる「うねり」と「海流の影響」について、それぞれ個別に考察した。

#### (1) 高知西部海域へ到達したうねりについて

第18図は5月27～29日にかけてのASCAT

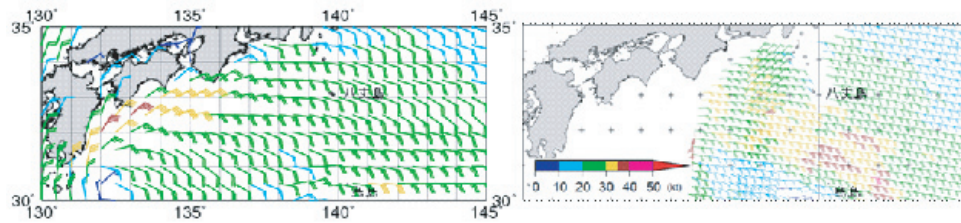


第18図 5月27～29日にかけての低気圧周辺の海上風の比較  
左図はGSM予想、右図はASCATによる解析。

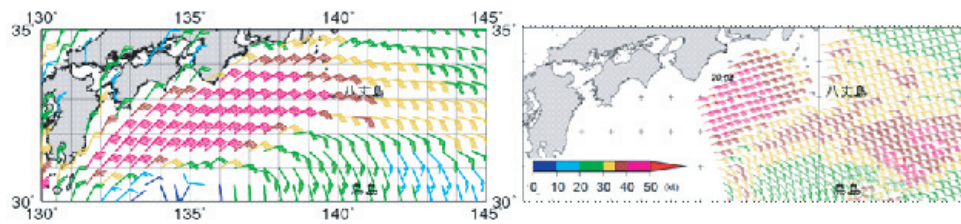
とほぼ同時刻における GSM を並べたものである。また、第 19 図は QuikSCAT とほぼ同時刻の GSM を並べたものである。高知西部海域へ大きな誤差をもたらしたうねりの波源を、海上風の予想と解析の比較から推察した。

27 日 09 時頃 (第 18 図 a) の紀伊半島沖の風に注目すると、風速は GSM・ASCAT と同じ 20 ~ 25knot であるが、風向は GSM ではほぼ東なのに対し、ASCAT では東南東とやや南成分をもっていた。このため、紀伊半島沖の風浪 (第 14 図より波高は 3m、波高 3m の風浪の周期は SMB 法より 7 秒と推定) を波源とするうねりは、波源のほぼ真西にあたる九州東岸よりむしろ西北西方向の高知西部海域を指向する形となった。紀伊半島沖の風浪を波源とするうねりは第 20 図より約半日で高知西部海域に到達 (到達時のうねりの周期

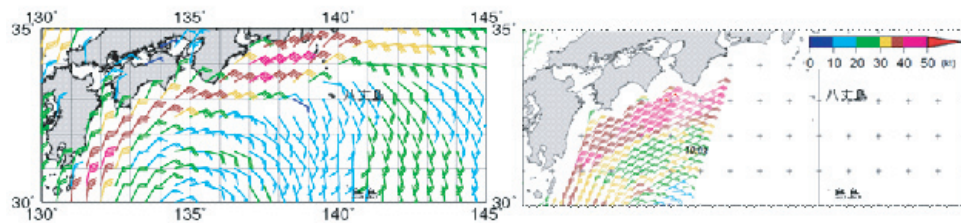
は 8 秒、波高は減衰率 0.7 より 2.1m と推定) するため、27 日 18 時から誤差が大きくなったと考えられる。27 日 21 時頃 (第 18 図 b) の紀伊水道沖の風に注目すると、風向は GSM・ASCAT とともに東北東で同じであったが、風速は ASCAT の方が 5 ~ 10knot も強かった。このため、高知西部海域へはより波高の大きいうねりが伝播し、28 日 06 時の 1 回目のピークとなったと考えられる。28 日 09 時頃 (第 18 図 c) の紀伊半島沖の風は空白域となっているが、高知西部沖ブイの風向が東北東から GSM と同じ北北東に変わった (第 16 図) ことから、紀伊半島沖の風向も GSM とほぼ同じ北北東だったと推定される。風向が東よりから北よりに変化したことにより、当海域を指向していたうねりは高知西部海域より南の海域を指向する形となった。更に北よりの風向は高知西部海域で



a. 5 月 27 日 18 時頃



b. 5 月 28 日 06 時頃



c. 5 月 28 日 18 時頃

第 19 図 5 月 27 ~ 28 日にかけての低気圧の北側の海上風の比較  
左図は GSM 予想, 右図は QuikSCAT による解析。

a. 5 月 27 日 18 時頃 b. 5 月 28 日 06 時頃 c. 5 月 28 日 18 時頃



は離岸風となるため、吹送距離は東よりの風に比べると短くなり、風浪も小さくなった。したがって、高知西部海域に到達するうねり、高知西部海域での風浪ともに小さくなったため 28 日 06 時以降波高は下降し、差も小さくなってきたと考えられる。

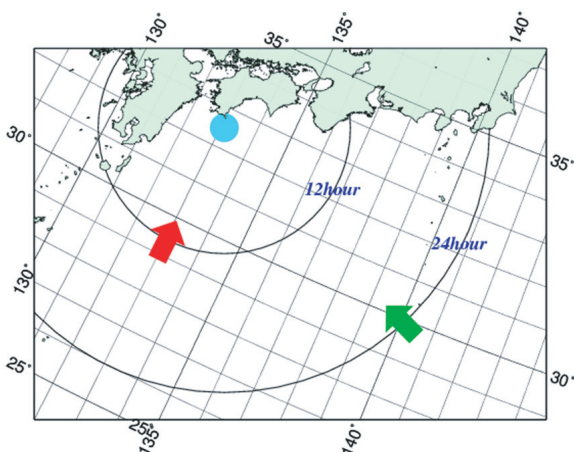
27 日 18 時頃 (第 19 図 a) の伊豆諸島八丈島と鳥島間の海域の風に注目すると、GSM では東 25knot と予想されていたが、QuikSCAT では風向は東南東で GSM よりやや南成分を持っており、風速は 30 ~ 40knot と GSM よりも強かった。このため、この海域での風浪 (第 14 図より波高は 3m、波高 3m の風浪の周期は SMB 法より 7 秒と推定) を波源とするうねりは、西北西方向にあたる高知西部海域へ予想よりも大きい波高で伝播し、第 20 図より約 1 日で到達 (到達時のうねりの周期は 9 秒、波高は減衰率 0.5 より 1.5m と推定) したと考えられる。28 日 06 時頃 (第 19 図 b) の紀伊半島沖の風に注目すると、GSM では北東 40knot と予想されていたが、QuikSCAT では風向は東北東で GSM より東成分がやや強く、風速は 45 ~ 50knot と GSM よりも強かった。このため、この海域での風浪 (第 14 図より波高は 6m、

波高 6m の風浪の周期は SMB 法より 10 秒と推定) を波源とするうねりは、西南西方向にあたる高知西部海域へ予想よりも大きい波高で伝播し、第 20 図より約半日で到達 (到達時のうねりの周期は 11 秒、波高は減衰率 0.78 より 4.7m と推定) したと考えられる。これら高知西部海域を指向する 2 方向 (東南東と東北東) からのうねりが 28 日 18 時頃ほぼ同時に到達したため、波高は急上昇するとともに、誤差も急拡大し、本事例の 2 回目のピーク=波高・誤差の最大となったと考えられる。28 日 06 時以降、波高は下降していたが、この時既に 2 回目のピークとなる 2 方向からのうねりは高知西部海域に向けて伝播し始めていた。28 日 18 時頃 (第 19 図 c) では、紀伊半島沖から四国沖にかけて風速は QuikSCAT が GSM より 5 ~ 10knot 程度強かったが、風向は GSM と同じ北東となっていて、この海域の風浪を波源とするうねりは高知西部海域の南の海域を指向する形となっていた。28 日 21 時頃 (第 18 図 d) では、紀伊半島沖の風に注目すると風向は GSM・ASCAT とともに高知西部海域を指向する東北東で同じであった。風速は ASCAT の方が 5knot 強かったが、28 日 06 時頃 (第 19 図 b) よりは弱かった。このため、高知西部海域を伝播するうねりは持続したが、波源付近での風速が下がったために波高も下がり、したがって高知西部海域に到達したうねりの波高も下降し、28 日 18 時以降の顕著な下降傾向になったと考えられる。

29 日 09 時頃 (第 18 図 e) の紀伊半島沖の風に注目すると、風速は ASCAT の方が 5knot 強かったが、風向は GSM・ASCAT と同じ北東となっており、この海域の風浪を波源とするうねりは高知西部海域の南を指向する形になっていた。東北東方向からのうねりの伝播が解消してきたため、29 日 09 時以降高知西部海域での波高は更に下がり、29 日 21 時頃 (第 18 図 f) では四国沖の風は風向風速ともほぼ GSM と同じとなったことから差も解消したと考えられる。

(2) 波浪と海流の関係 (しお波)

波向と反対方向の強い海流や潮流がある海域では、波高の増大や波長の短縮が起こることが知



第 20 図 高知西部海域 (水色領域) を指向するうねりについて、波源の位置と当海域へ到達するまでの所要時間を表す図

例えば、図中緑色矢印の位置に高知西部海域を指向する波源 (波高 3m・周期 7 秒) があつた場合、この波源からのうねりは波高 2.1m・周期 8 秒で約 12 時間後に高知西部海域に到達することを意味する。



られており、この現象は「しお波」とよばれている。第 21 図は北西太平洋海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-WNP) による 2009 年 5 月 28 日四国沖の海流図である。足摺沖から紀伊水道沖にかけて北東～東北東方向へ流れる海流 (黒潮) が解析されており、高知西部海域へ伝播して来た東北東方向からのうねりと対向する状況となっている。しお波による波高の増大の効果を確かめるため、久保・高野 (2010) が考案したしお波による波高の増幅比を算出する式を利用した。

$$\text{増幅比} = \frac{h}{h_0} = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{4U}{c_0} + \sqrt{1 + \frac{4U}{c_0}}}} \quad (1)$$

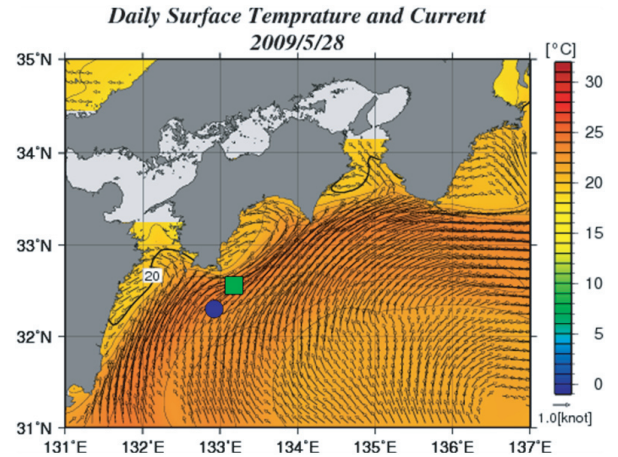
ここで、 $h$  はしお波により変形した後の波高、 $h_0$  は変形する前の波高、 $U$  は海流の波向成分、 $c_0$  は波の位相速度である。波の位相速度は、波の周期  $T$  を用いて次の式で表せる。

$$c_0 = 1.56T \quad (2)$$

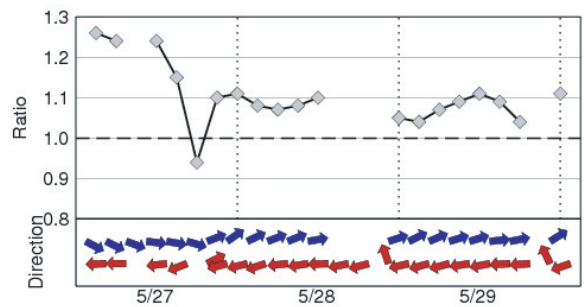
(1) 式と (2) 式より、しお波の効果は波向と対向する海流の速さが大きいほど、また波の周期が短いほど増幅比が大きくなることを表している。

高知西部沖ブイでは海流を観測していないので、増幅比の算出に必要な海流データには当ブイの南南西約 40km にある土佐黒潮牧場 13 号ブイ (高知県が設置した浮き漁礁ブイ) の観測値を用いた。両ブイの位置を第 21 図に示すが、ブイ間の距離は小さいため、黒潮牧場 13 号ブイの海流データは、高知西部沖ブイでの海流データとして扱えるものとした。また、周期と波向のデータは高知西部沖ブイの観測値を用いた。こうして得られた海流の速さと波浪の周期を (1)・(2) 式に代入して求めた高知西部海域でのしお波による波高の増幅比の経過を第 22 図に表す。欠測のところもあるが、誤差が大きかった 5 月 28 日の波高の増幅比は 1.1 前後で経過したとみられる。しお波の効果により東北東方向からのうねりの波高が 1 割程度増幅したために、差はいっそう大きくなったと考えられる。

以上をまとめると、高知西部海域で波高が予想



第 21 図 海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-WNP) により解析された 5 月 28 日の四国沖の海面水温と海流図  
■は高知西部沖 GPS 波浪計の位置を、●は黒潮牧場 13 号ブイの位置を表す。



第 22 図 土佐黒潮牧場 13 号ブイの海流データと高知西部沖ブイの周期と波向データから求めたしお波による波高の増幅比の経過図 (5 月 27 ~ 29 日、3 時間間隔)  
青色矢印は海流の向きを、赤色矢印は波向を表す。

より 4m 以上も高かった本事例では、予想の誤差の最大の要因として、うねりの予想が過小であったことが挙げられる。うねりの予想が過小だったのは、海上風の経過が予想と異なったためである。海上風が予想と異なるパターンとして、

- ①風向は予想どおりだが、風速が異なった
- ②風速は予想どおりだが、風向が異なった
- ③風向・風速とも予想と異なった

が挙げられ、全てのパターンが現れた。また、波高の予想が過小となったが、海上風の予想と実況の違いによっては本事例とは逆に過大のケース

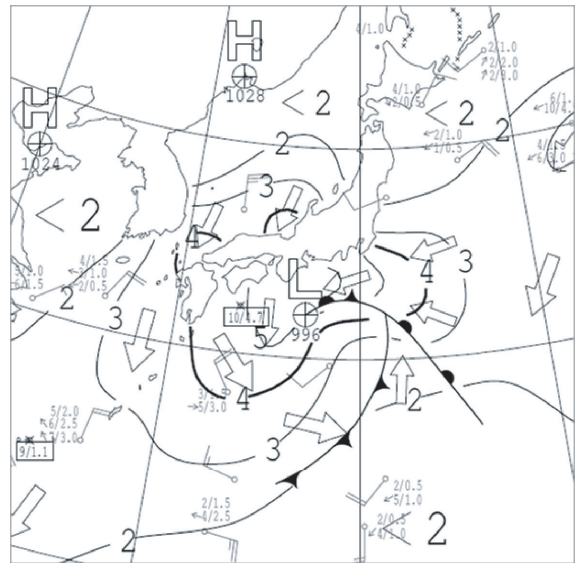
もありうる。風向の違いはうねりの伝播方向，風速の違いはうねり波高の大きさに影響すると考えられ，解説資料の作成にあたっては，うねりの波源という観点から海上風の経過に注視し，GSMとの違いを的確に判断することが重要である。

また，高知西部海域は東北東流する黒潮の流路にあたっており，波向が黒潮の向きに正対する方向，すなわち，東北東方向からの波向となる場合はしお波の効果による波高の増幅を考慮する必要がある。しお波による波高の増幅比は，海流の速さと関係があることから，黒潮の流速の状況にも留意しなければならない。しお波の効果はモデルには組み込まれていないため，モデルの予想と実況との差を生む要因として十分に考えられる。当海域を対象とする解説資料の作成においては，海上の風向風速やうねりの伝播方向といった波浪に関する資料だけでなく，黒潮の状況といった海況に関する資料にも着目することが重要である。

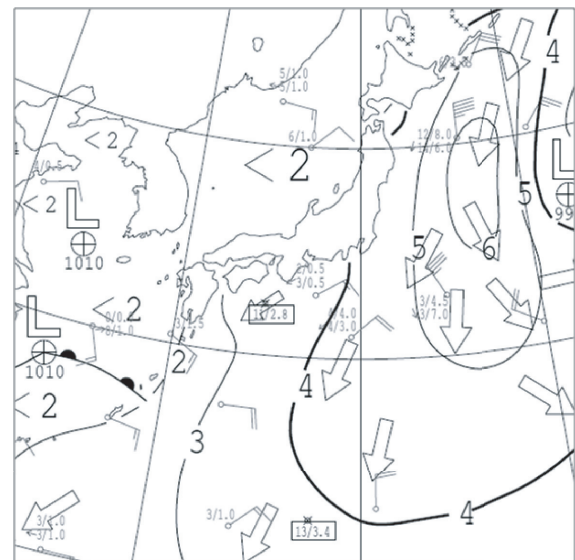
### 3.3 南岸低気圧の通過時に日向灘に到達したうねりの事例

#### 3.3.1 気象と波浪の概況

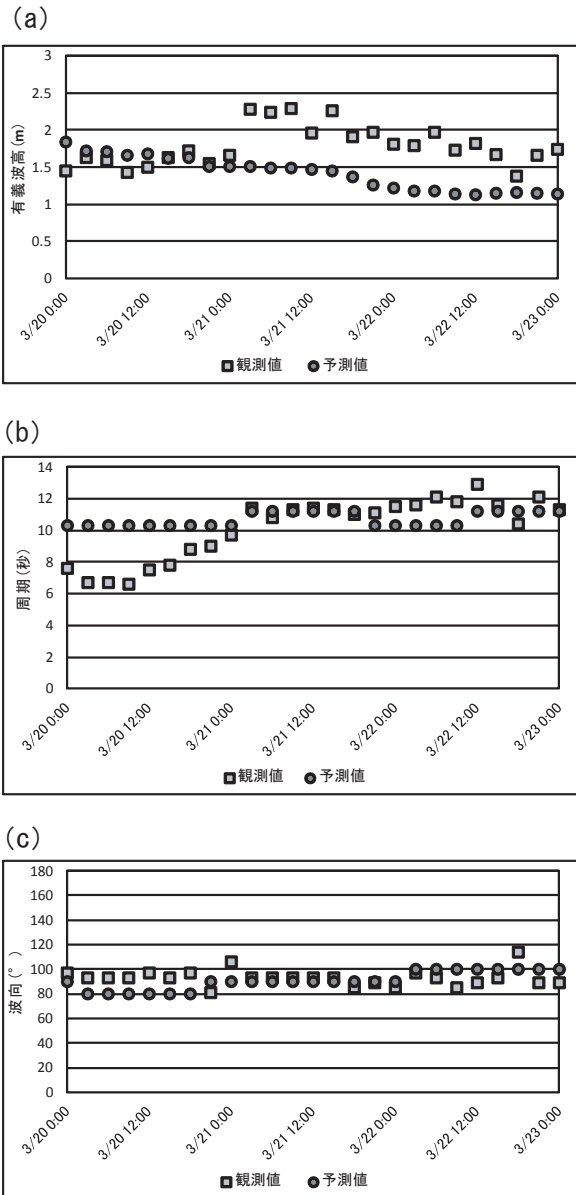
2008年3月20日に低気圧が紀伊半島沖を東進し，東海沖で風浪が発達して，海上では大しけとなった(第23図)。この際，低気圧北側で東よりの風が強まり，波高の実況は沿岸波浪モデルに比べて1.0m以上高かった。21～23日に低気圧は日本の東へ遠ざかったが，日向灘では2m台の波が続いた(第24図)。宮崎県細島港にある港湾局沿岸波浪計(以下，細島)では，3月21日未明から波高1.5～2.3m(第25図a)，周期10～13秒(第25図b)で，波向は東(第25図c)の波が観測された。



第 23 図 外洋波浪図 (2008 年 3 月 20 日 09 時)



第 24 図 外洋波浪図 (2008 年 3 月 22 日 21 時)



第 25 図 3 月 20 ~ 22 日細島での観測値と沿岸波浪モデルによる予測値  
 (a) : 有義波高 (b) : 周期 (c) : 波向

### 3.3.2 実況とモデルの比較と誤差要因の検討

3 月 21 ~ 22 日にかけての細島での観測値と予測値との波高差は 0.5 ~ 1.0m だった. この誤差要因について以下のとおり検討した.

3 月 20 日 09 時の沿岸波浪図 (第 26 図) から東海沖での波高 6m の波高域を波源として推算を行った. 日向灘までの伝播距離は約 350 海里, 波源の風浪が 6m であることから周期は 10 秒程度であることが分かる.

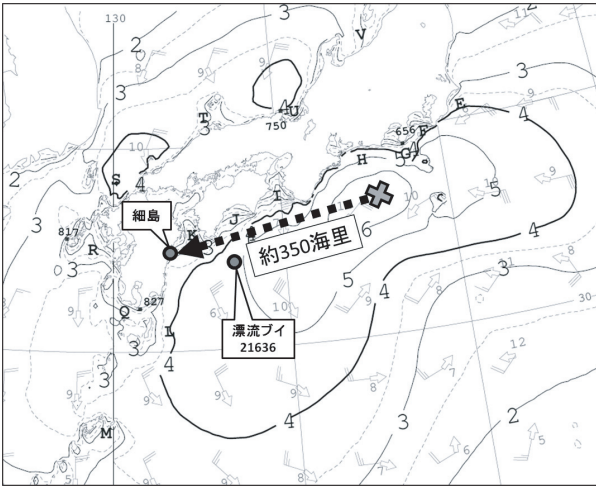
うねりは推算グラフ (第 27 図 A 点) から周期 11 ~ 12 秒, 到達時間が約 20 時間で到達すると考えられ, 観測値とおおむね一致する. 波高は, 波源の周期と伝播距離から減衰率が 0.65 となり, うねりの波高は 3.9m ( $= 6.0\text{m} \times 0.65$ ) で観測値とは大きく異なる. これは, GSM の海上風予測 (第 28 図) から推定される波源の風向が北東で, 伝播するうねりの波向が細島より南を指向し, うねりの向きと細島との間に 40 度の角度のずれが生じていることを考慮していないためである. この角分散は, 波高とエネルギーの分布 (第 11 図) から角伝播係数  $0.77 (= \cos 40^\circ)$  となり, 波高は 3.0m となる.

うねりの到達予想は, 20 時間後 (第 27 図 A 点) の 21 日朝で, 海上風は風向が北北西 ~ 北で, 細島では離岸風となり, 風浪が十分に発達できる状況でないことから, 合成波高への影響は小さく, うねりが卓越していたと考えられる.

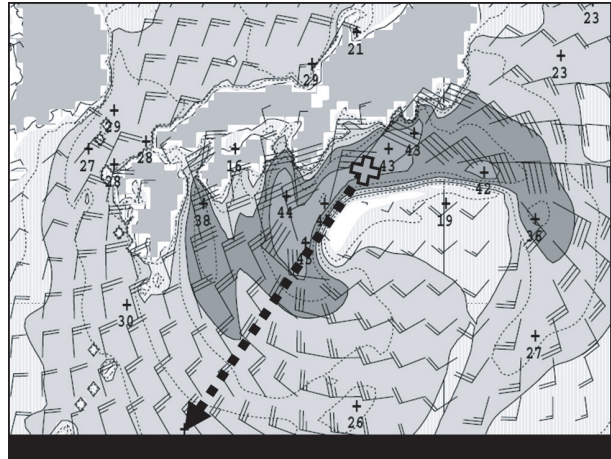
また, 細島へ到達するうねりは浅水変形が考えられる. うねりの周期を 11 秒と仮定すると, 沖合での波長 ( $L_0$ ) は「波長 =  $1.56 \times \text{周期} \times \text{周期}$ 」の関係があることから, 約 190 ( $\approx 1.56 \times 11^2$ ) m となる. 細島の水深は 50m であることから,  $h$  (水深) /  $L_0$  (沖合の波長) は 0.26 で, 浅水変形による浅水係数 ( $K_s$ ) は 0.92 (第 29 図 A 点) となり減衰することとなる. この浅水係数を考慮すると, 細島に到達するうねりは 2.8m ( $= 3.0\text{m} \times 0.92$ ) となり, 観測値の 2.3m とおおむね一致する.

東海沖で予測値より実際の波高が約 1.0m 高くなった要因としては, 低気圧北側での風浪が沿岸波浪モデルより高めになったため, うねりとして伝播した際に観測値が高くなったと考えられる.

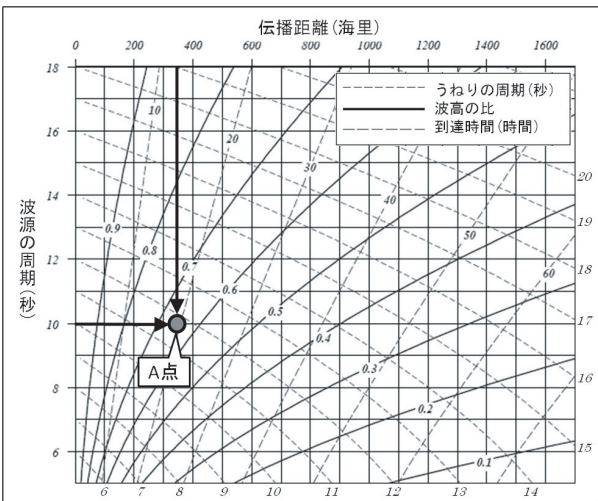




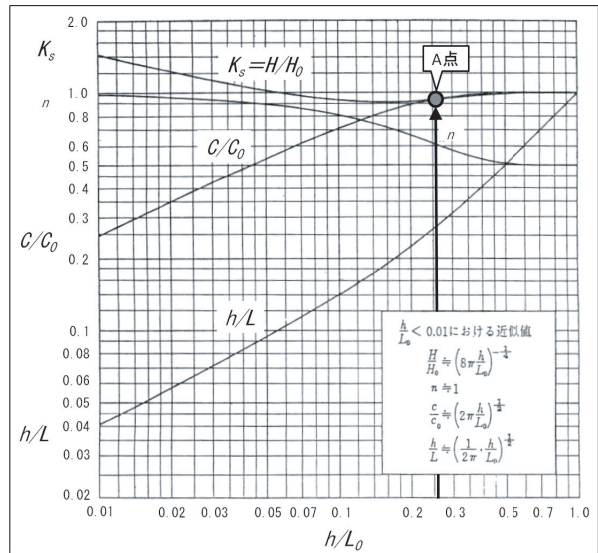
第26図 沿岸波浪図 (3月20日09時)  
 ×: 波源 ←: 伝播距離 ○: 観測地点



第28図 GSMによる風予想図 (3月20日09時初期値の海上風を示す)  
 ×: 波源 ←: うねりの波向



第27図 うねりの推算グラフ



第29図 浅水波の特性  
 水理公式集 昭和46年度改訂版を参照。



### 3.3.3 解説資料の検討

前項の検討結果を踏まえ、日向灘における波浪に関する解説資料の検討を行った。うねりの波源となる風浪の波高を適切に推定し、波浪計の観測特性を把握することにより、有効な修正ができると考え、3月21日の解説資料作成の際の着目点を以下に示す。

まず、波源での波高が分からないため、四国沖の気象庁漂流ブイ 21636 (以下、ブイ) の観測値から波源を逆算する (ブイの位置については第26図参照)。3月21日3時ごろのブイの観測値は4.7m程度 (第30図) である。この時間の海上風は、GSMの予測値から北よりの風 25knot であり、吹送距離 60 海里から風浪は 2.2m と推定される。合成波高が 4.7m 程度であることから、うねりは 4.0m 程度と推定できる。このうねりの波源を東海沖と考え、ブイと波源の距離を 250 海里として、推定したうねりの波高から波源の波高を逆算すると、波源の波高は 6m となり、波高の実況がモデルより 0.5 ~ 1.0m 高いことになる。

このことから、伝播してくるうねりは角分散を考慮しても、21日はモデルより高くなるのが分かるため、解説資料では日向灘から沖縄にかけては、波浪モデルより約 1.0m 高い修正が可能である。また、うねりの周期についても推定可能であり、地方中枢で予報にうねりの表記を付加するかどうかの判断材料を提供することが可能である。

以上のとおり、日本の南岸沿いを低気圧が通過し、東海上で風浪が発達して、日向灘にうねりが伝播してくる事例の解析を行った。このうねりを

検討・評価する際は、波源の波高を的確に推定してうねりの推算を行うことが必要である。これと同時に伝播経路上での実況の観測値とモデルの予測値の比較を行うことで、モデルとのずれを考慮した修正量を解説することができる。また、うねりの主方向とのずれを把握し、角分散による減衰を考慮することにより、実測値に近い修正量の解説が可能となる。

## 3.4 冬季日本海における寒気移流による風浪の発達事例

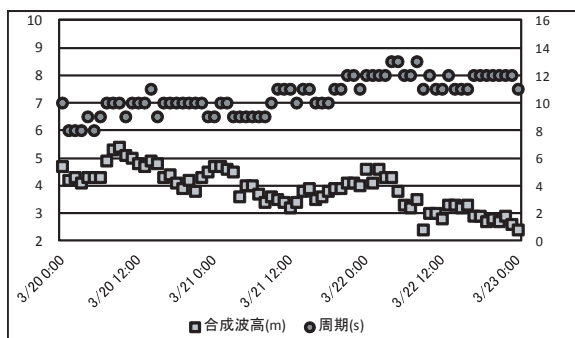
### 3.4.1 気象と波浪の概況

2008年12月25日から26日にかけて低気圧を含む気圧の谷が日本海を北東進し (第31図)、気圧の谷通過後は寒気移流による風浪が発達、北日本の日本海沿岸では 5 ~ 6m の警報クラスの高波になった (第31, 32, 33図)。瀬棚・酒田 (位置は第34図参照) の2地点に注目して解析を行った。

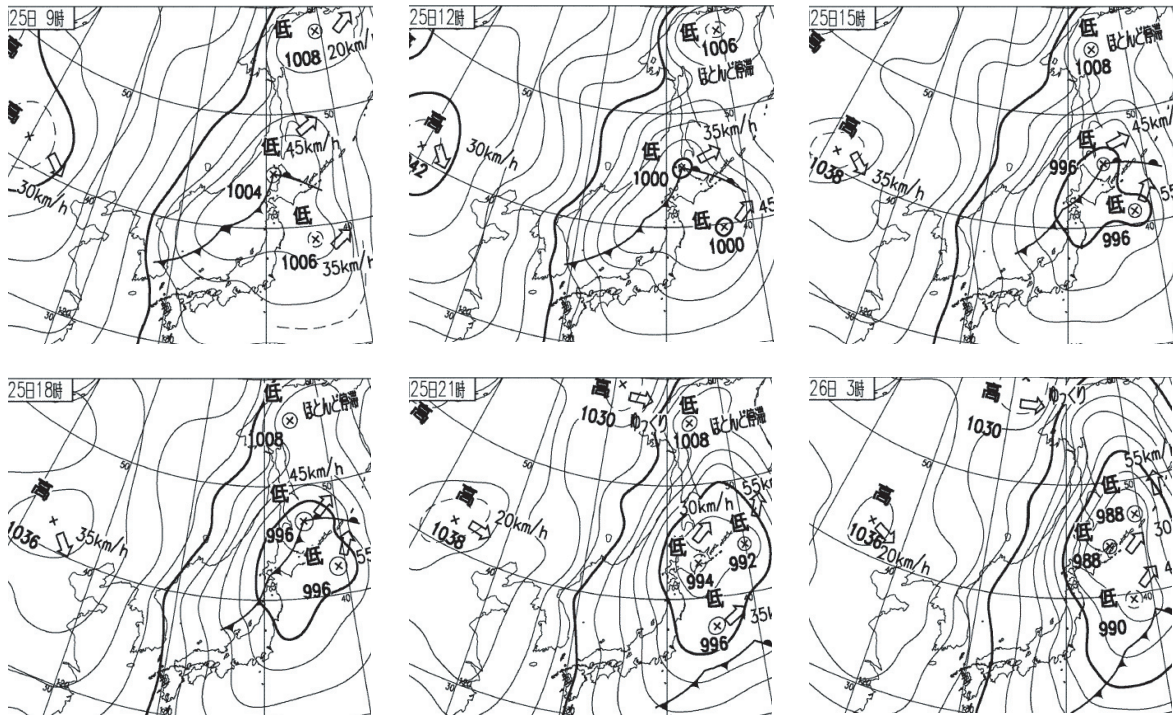
第35図上によると、瀬棚では25日12 ~ 18時にかけて、寒冷前線の通過により、風向の変化 (西南西 → 北北西) と風速の強まり (2m/s → 7m/s) が見られるが、波高の変化は見られなかった。これは前線通過時の風速が 7m/s 程度で強まらなかったことと、寒気移流に伴う吹き出しによる北西風が強まるまでに一旦小康状態があり、吹続時間が短かったためと考えられる。

前線通過から寒気の吹き出しまでのタイムラグは、第36図の25日10時30分頃の ASCAT が捉えた日本海の海上風にも表れている。日本海中部では、寒気の吹き出しによる約 35knot の西 ~ 北西風が吹いているが、沿海州北側の沿岸の海上風は25日10時30分頃ではまだ弱い事が分かる。沿海州北側の沿岸での寒気の吹き出しの始まりは、地上天気図 (第31図) 及び GSM (第33図) から分かるように25日12 ~ 18時頃と考えられる。また、その吹き出しが瀬棚に到達したと考えられる9時間後の、25日21時頃から、北西風が急激に強くなり、発達した風浪により波高は 1.5m から26日の04時には 6m に達し、10秒程度の周期を観測した (第35図上)。

酒田では、25日の12 ~ 15時にかけて気圧の谷の通過により風向の変化 (南東 → 西) と風速の強

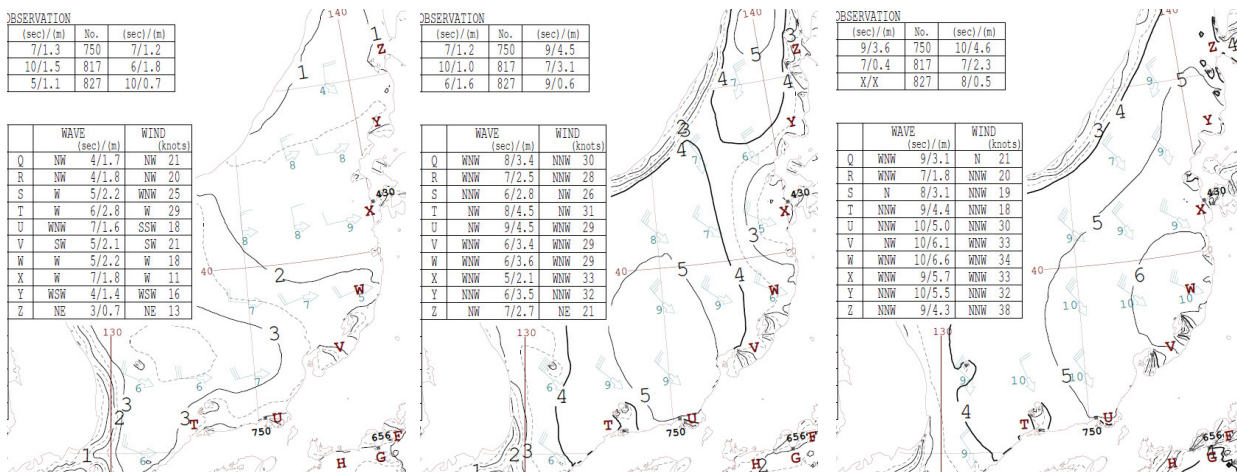


第30図 3月20 ~ 22日四国沖漂流ブイ (21636) の観測値



第31図 地上天気図

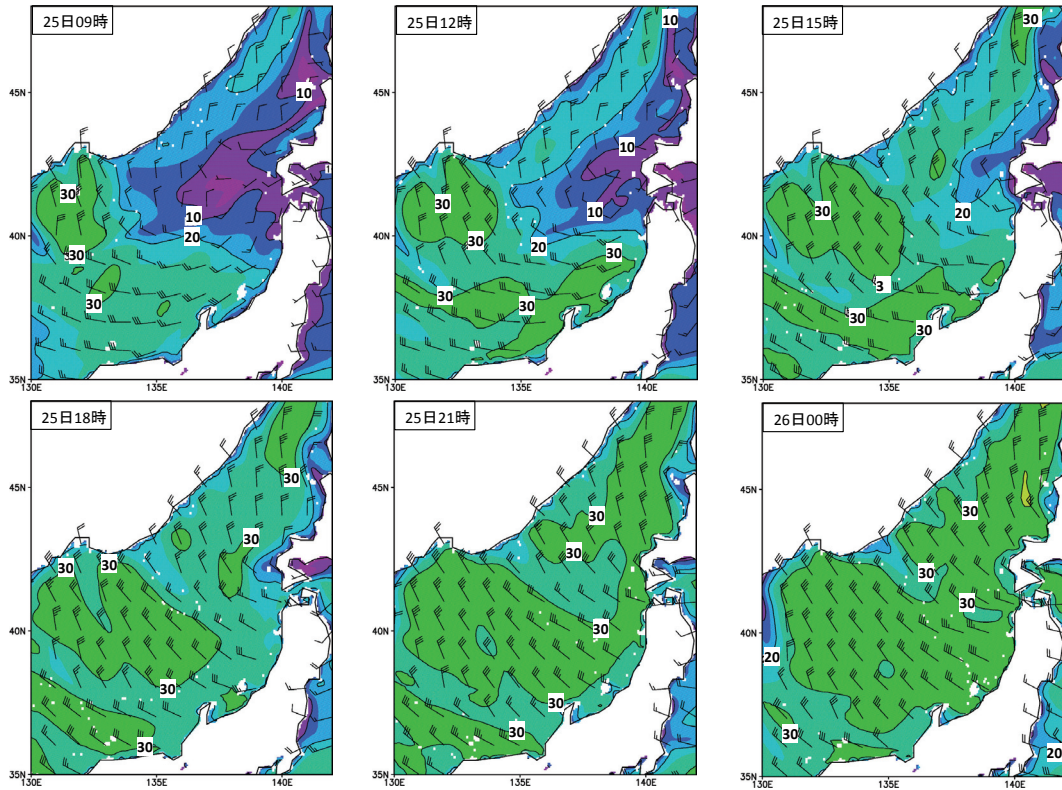
2008年12月25日09時, 12時, 15時, 18時, 21時, 26日03時



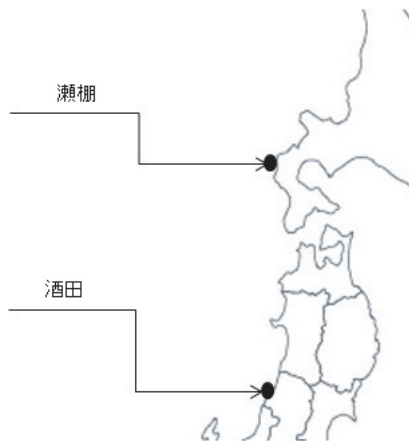
第32図 沿岸波浪図

2008年12月25日09時, 21時, 26日09時.

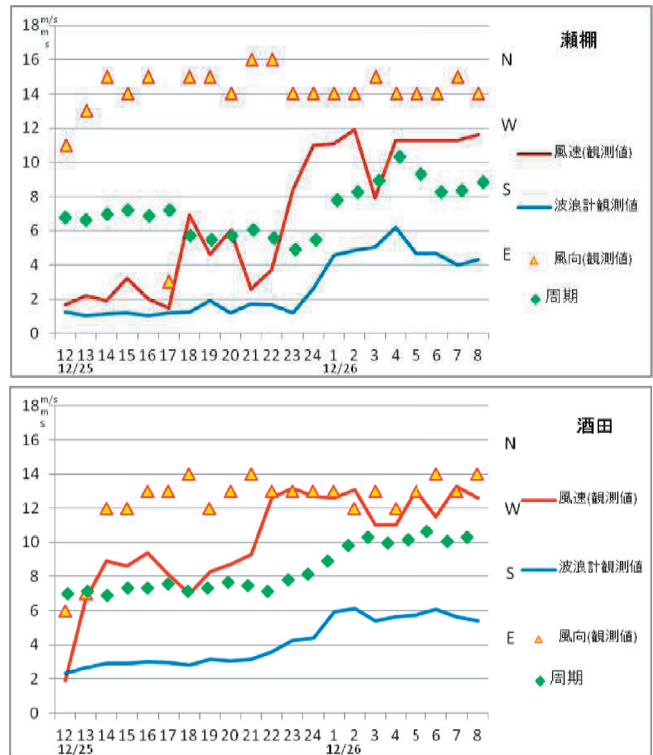




第33図 GSMによる風予想図(図中の色分けは風速を示す)  
12月25日00UTCを初期値とし、左上FT=0から右下FT=15まで3時間ごと。

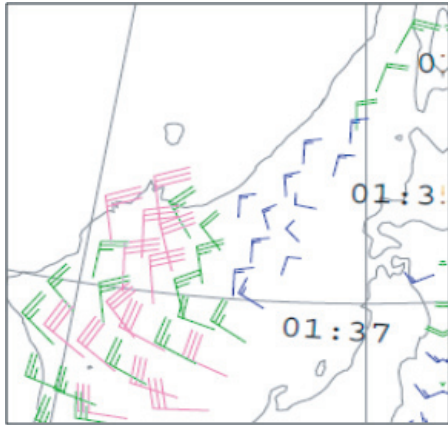


第34図 港湾局瀬棚・酒田の波浪計設置場所



第35図 アメダス及び波浪計の時系列図  
12月25日12時～26日08時の観測値・周期及びアメダスの風向，風速の変化を示す。





第36図 衛星による風観測値  
12月25日10時30分頃のASCATで観測された海上風の観測値

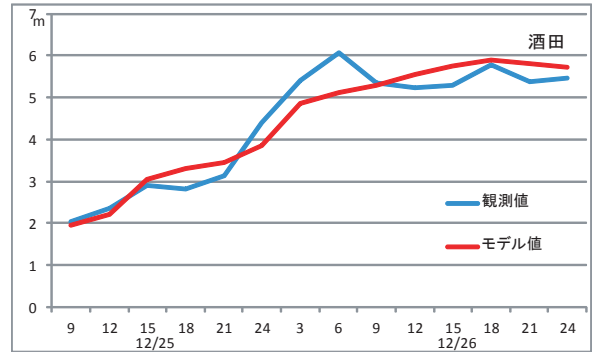
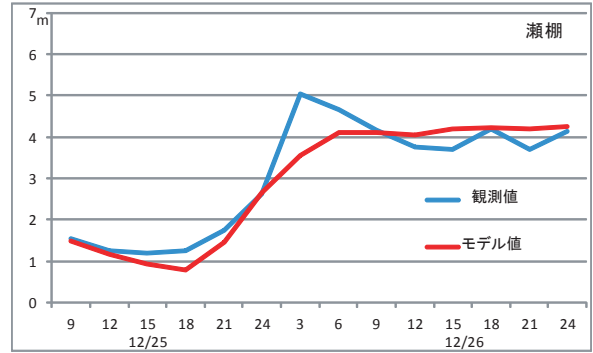
まり (2m/s → 9m/s) が見られるが、波高の変化は見られなかった。瀬棚と同様に風速が8m/s程度と波高を急激に上昇させるほどの風速ではなかったが、もともと2m程度の波高があり、3m程度の波高となった。その後22時頃から寒気の吹き出しにより北西風が強まり (9m/s → 13m/s)、波高は26日の02時には6mに達し、10秒程度の周期を観測した (第35図下)。

### 3.4.2 波高推算による解説資料の検討

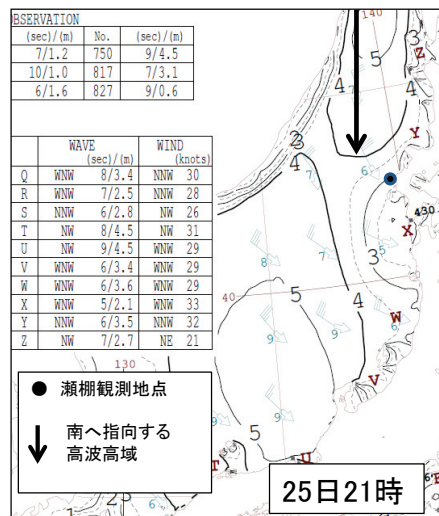
波浪の観測値とモデル予測値の比較 (第37図) によると、25日夜から26日朝にかけて誤差が大きくなっており、同期間に注目して波高値の推算を行うことにより解説資料の着目点を検討した。

瀬棚の風浪をSMB法により推算する。GSMの予測値や衛星による観測値から、沿海州北側の沿岸から瀬棚沖海上では25日昼頃から26日未明にかけ30knotから40knotの風が吹いたと考えられる。25日12～18時の6時間の風速を30knot、25日18時～26日03時の9時間の風速を40knot、沿海州北側の沿岸からの吹送距離を300海里と仮定した場合、推算される波高は5.3mとなり瀬棚で観測された波高とほぼ合致し、吹続時間、吹送距離が十分あり風浪が発達したと考えられる。第38図では、沿海州北側の沿岸から南へ指向する高波高域が解析されている。

酒田の風浪をSMB法により推算する。酒田で



第37図 観測値とモデル予測値の比較図  
12月25日9時～26日24時の波高を示す



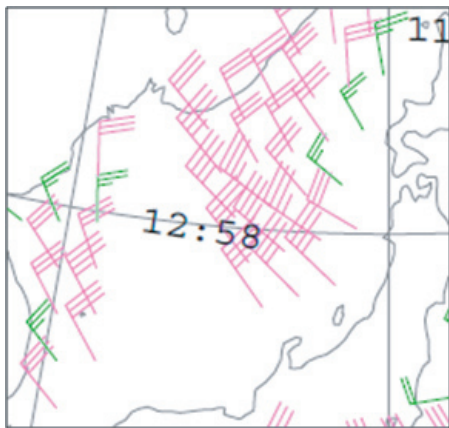
第38図 沿海州北側の沿岸から南へ指向する高波高域

は、風浪が発達する前から、波高は2m程度あり (第35図下)、その後寒気移流により風浪が発達している。既にある2mの波高を考慮し、沿海州南側の沿岸からの吹送距離300海里、風速35knot、26日03時までの吹続時間約16時間と仮定し、風浪の推定グラフから波高を求めると

5.5m となる。

日本海中部では 25 日 22 時頃の ASCAT (第 39 図) によると、30 knot 程度の寒気の吹き出しが始まっており、前線通過後すぐに酒田に到達し、吹続時間及び吹送距離が充分にあったため、風浪が発達したと考えられる。

以上のとおり、冬季日本海における寒気移流による風浪の発達は、今回の事例のように、日本海側のアメダス地点で吹き出しの風を観測してから急激に高まる場合がある。例えば 15m/s の風の場合、SMB 法では 5m に達するには 24 時間程度要するが、実際にはアメダス実況で 12 ~ 13m/s の風が 2 ~ 3 時間吹いて 5m 程度の波高となっている。これは、風浪の発達の要因となる吹続時間は、



第 39 図 衛星による風観測値  
12 月 25 日 22 時頃の ASCAT で観測された海上風の観測値

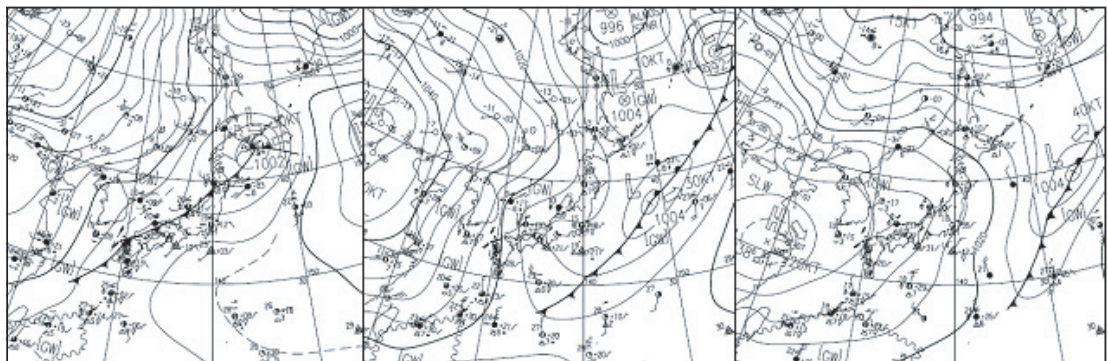
その地点で吹き出した時間より、上流となる沿海州北側の沿岸及び沿海州南側の沿岸で吹き出しからの時間が重要になるからである。今回の事例により、風浪は風からのエネルギーを受け始めてからの積み重ねにより発達していることが確認できた。寒気移流の際の解説資料には、上流となる沿海州北側の沿岸及び沿海州南側の沿岸での吹き出しにも注目し、日本海北部に到達する場合はそれを記述することが重要である。

### 3.5 近畿北部沿岸海域において波浪モデルの誤差が大きかった事例

#### 3.5.1 気象と波浪の概況

2009 年 11 月 1 ~ 3 日の 09 時の天気図を第 40 図に示す。10 月 31 日に日本海を東進した中心から北陸 ~ 山陰地方付近の海岸線にほぼ平行な寒冷前線を伴う低気圧は、11 月 1 日 09 時頃には北海道東岸付近に進み、この寒冷前線の通過後には冬型の気圧配置となった。翌 2 日には日本海寒帯気団収束帯上に発生したメソじょう乱が西日本を通過して、冬型の気圧配置が強まった。その後 3 日 09 時には移動性高気圧が華中へ進み、冬型の気圧配置は次第に緩み始めた。

丹後半島 (京都府) 北端の経ヶ岬 (波浪計設置地点) 近傍にあるアメダス観測点の間人 (たいぎ) (位置は第 41 図参照) では、1 日 11 ~ 12 時の間に風向が南東から北東に変わった (第 42 図)。同時に気温も急降下しており、この頃に寒冷前線が通過したものと考えられる。前線通過後、間

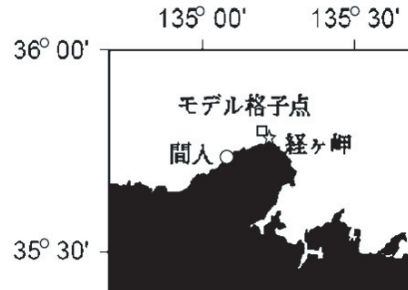


第 40 図 地上天気図  
左から 2009 年 11 月 1 日 09 時, 2 日 09 時, 3 日 09 時

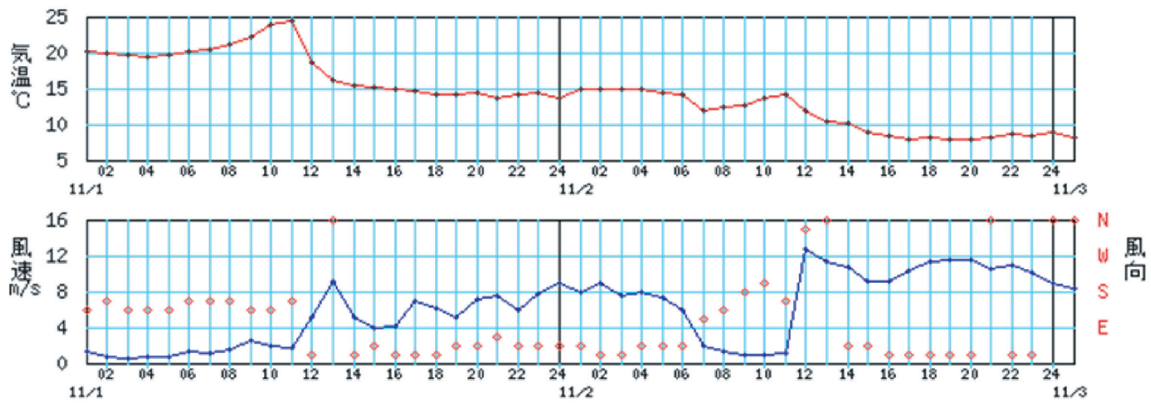
人では北よりの風が強まり (9m/s 程度), 経ヶ岬の波高は, 1日12時の波高0.3mから15時には1.6mへ急上昇した (第43図). その後も北東6~8m/s程度の風が続いたため, 2日06時には波高3.4mに達した.

2日10時頃の衛星 (ASCAT) や GSM の風向をみると, 山陰沖 (約100km以上の沖合) では北東であった (第44図). この頃, 丹後半島では, メソじょう乱の接近に伴い, 一時的に南よりの離岸風 (間人では07~11時まで風速1m/s程度) となったが, 経ヶ岬では周期約9秒, 波高約3mを観測していた. 間人では上述のメソじょう乱の通過に伴い, 2日11~12時の間に北よりの風に急変し, 12時には約13m/sを観測した. その後,

風速10~12m/s程度の風が続き, 経ヶ岬では波高が再び急激に上昇して, 21時頃には波高約6mを観測した.

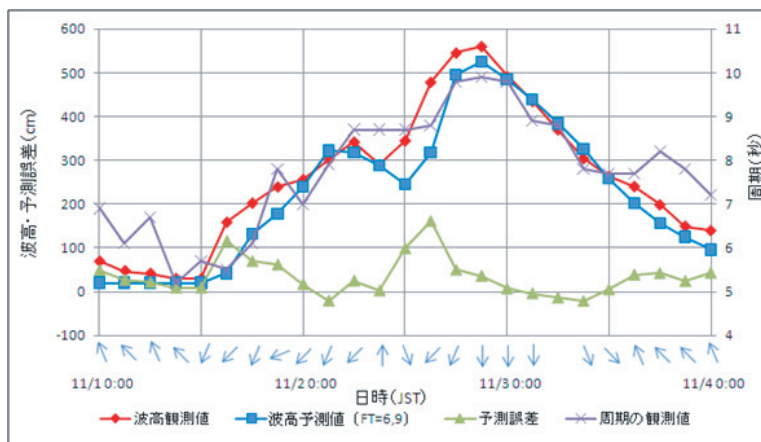


第41図 経ヶ岬沿岸波浪計と間人アメダス観測地点及び波浪モデルの格子点の位置



第42図 アメダス時系列図

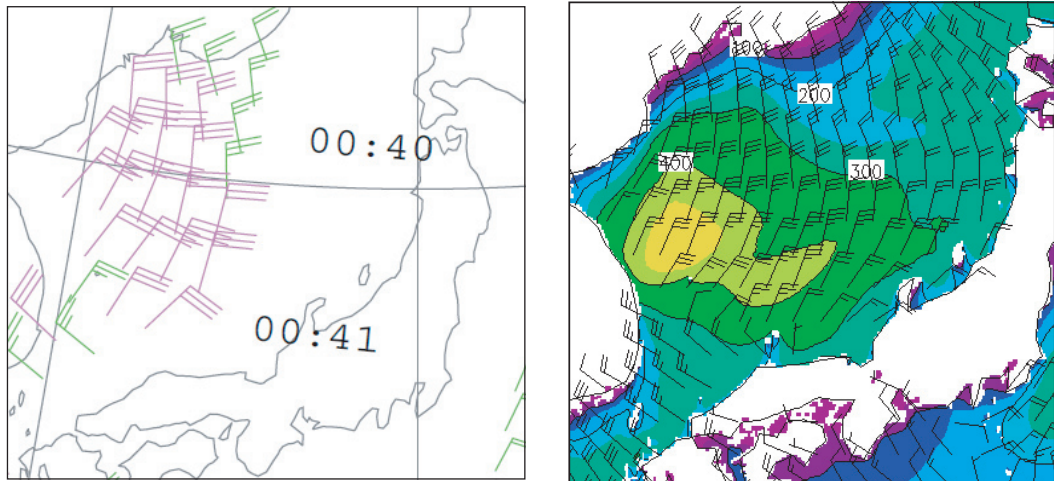
11月1日01時~3日01時の間人の毎時時系列図. 上は気温, 下は風向風速の変化を示す.



第43図 経ヶ岬における波浪時系列図

11月1~3日. グラフ下の矢印は間人の風向を示す. 波高観測値を赤色, 波高予測値を青色, 予測誤差 (予測値 - 観測値) の正負を逆にしたものを緑色, 周期の観測値を紫色で示す.





第44図 衛星による風観測値とGSMによる風予想図

11月2日10時頃 左：ASCATによる風観測図，右：GSMによる風予想図（初期時刻2日00UTC：図中の色分けは同じ初期時刻の波浪モデルの波高を示す）。

### 3.5.2 波高推算による解説資料の検討

1日の寒冷前線通過時と2日のメソじょう乱通過後の冬型の気圧配置の強まりというステージで誤差が大きくなっており、それぞれの期間に注目して波高値の推算を行い、解説資料の着目点を検討した。

まず、1日は風の急変後の15時に経ヶ岬の観測値が1.6mと急上昇している。その要因は風浪と考えられることから、SMB法によって波高を推算する。丹後半島の間人では11～12時の間に気温と風が急激に変化しており、13時には北約9m/sの風を観測した後、北東の風が継続した（第42図）。丹後半島の沖合の海上では、陸地の影響を受けないので、間人よりも風速が強いと考えられることから、推算に用いる海上の風速については25knot程度とする。間人の風向より海上の風向も北東と見込まれるが、寒冷前線後面が北西風の場合と異なり、北東風（前線に平行に近い風）の場合は新たに波を発生しながら南下するため、吹続時間や吹送距離を決めることは容易ではない。ここでは経ヶ岬の北東沖から北東風が1日11時頃から15時頃までの約4時間吹き続けたとし、吹送距離をおよそ200海里程度と仮定する。SMB法による推算結果では、波高約1.5m、周期約5秒と見積もられ、経ヶ岬の観測値（波高1.6m、周期5.5秒）と近い値となった。この事例

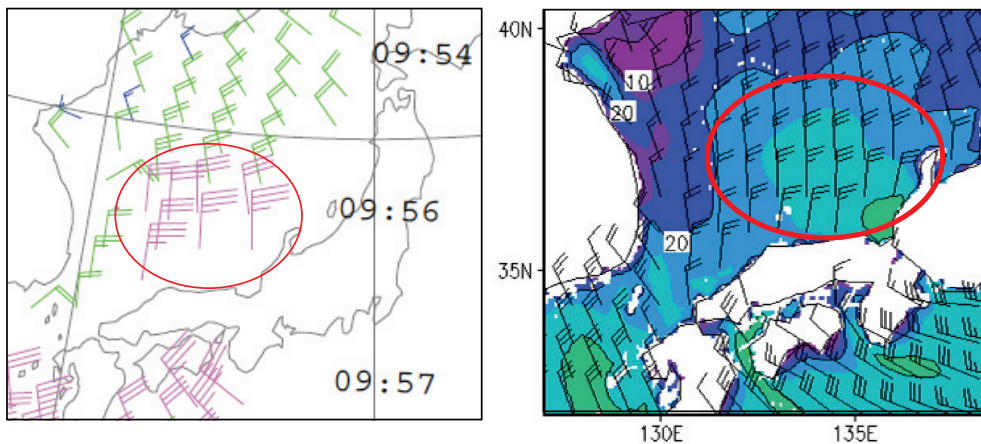
は短時間の現象であり、また、前線通過後の風向変化による波高の見積りも難しいことから、解説資料へどのように反映できるかは今後の課題である。

次に、2日は09時頃に経ヶ岬で3mであった波高が12時より急上昇し、15時の誤差が1.6mと大きくなった。この波高の推移を推算し、誤差の要因を検討した。3mの波については、前日の1日10時過ぎ、佐渡沖から北海道西方海上の海域で3.5m～3.9mの波高が衛星によって観測（図省略）されており、イントラHPに示されているうねり減衰表を参照すると、経ヶ岬にはこの海域からのうねりが3mに減衰して北北東～北東方向より到達していたものと考えられる。その後、メソじょう乱通過後の冬型の気圧配置の強まりにより風浪が発達し、波高が高まった。15時における誤差の要因としては、風浪の立ち上がりが遅れるという波浪モデルの特性のほか、風向が北よりに変化するタイミングがGSMの予測では3時間程度遅れていたことが考えられる。また、GSMの2日21時の予測風速（25～30knot）が、衛星による観測（19時頃の観測値：30～35knot）より5knot程度弱かったことから、過小となったことも考えられる（第45、46図）。GSMの風速の予想が5knot程度過小だったと仮定して11～18時を風速40knot、18～21時を35knotと考え、

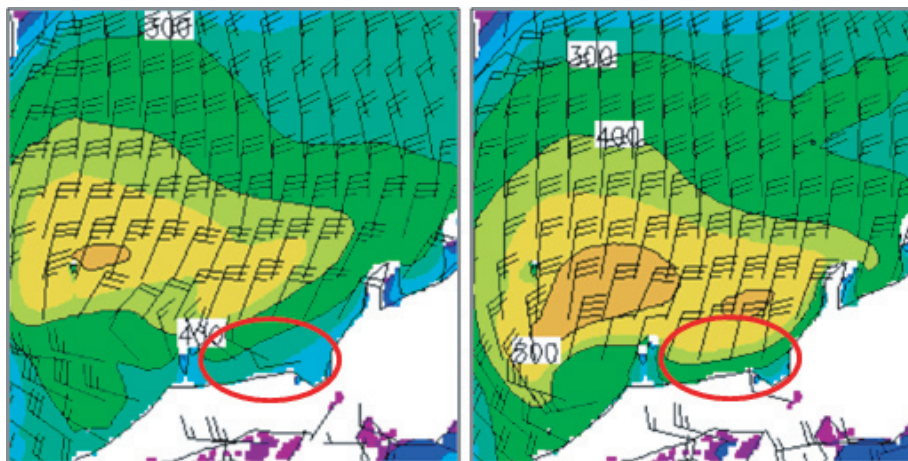
波高 3m 程度のうねりが存在する状態から、吹送距離 300 海里で SMB 法により波高を推算すると、第 47 図の通り、波浪モデル予測値よりも観測値に近い値を見積もることができる。

以上まとめると、今回のように冬型の気圧配置が強まり風浪の発達が予想される場合、解説資料には衛星による海上風や波浪の観測実況で沖合の状況を的確にコメントすることが求めら

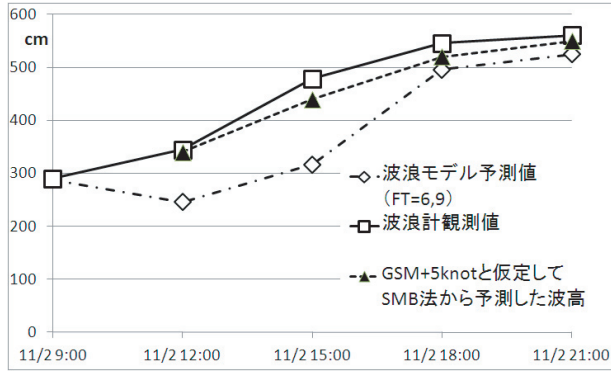
れる。例えば、2 日 10 時の段階では「1 日 22 時頃の衛星の風観測によると、日本海中部から日本海西部で 30 ～ 35knot を観測しており、おおむね GSM+5knot 程度。目先は実況から波高を検討。その後は波浪モデルを基本と考えるが、波浪モデルの特性を考慮し、風浪の立ち上がりはモデルより早目に修正。」のようなコメントが可能であったと考えられる。



第 45 図 衛星による風観測値と GSM による風予想図（図中の色分けは風速を示す）  
 左：2009 年 11 月 2 日 19 時頃の QuikSCAT データ。赤丸内は風速 30 ～ 35knot を示す。  
 右：2009 年 11 月 2 日 21 時の風予想図（初期時刻 2 日 06UTC）、赤丸内は風速 25 ～ 30knot を示す。

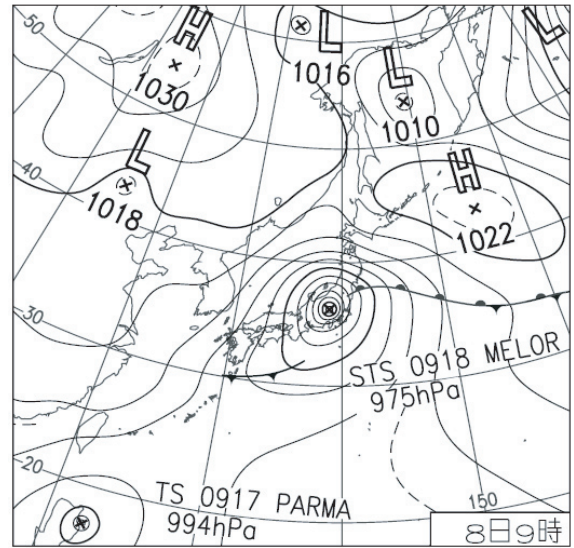


第 46 図 GSM による風予想図（初期時刻 2 日 00UTC：図中の色分けは同じ初期時刻の波浪モデルの波高を示す）  
 左：2009 年 11 月 2 日 12 時予想図。右：2009 年 11 月 2 日 15 時予想図  
 赤丸は間人付近の海域を示す。



第47図：波浪計観測値と波浪モデルの予測値及び風速をGSM+5knotと仮定した場合の波高予測値(2009年11月2日09～21時)

GSM+5knot:11～18時を40knot, 18～21時を35knotとした。(北風は11時から始まったと仮定)



第48図 地上天気図(2009年10月8日9時)

### 3.6 2009年台風第18号による関東近海の波浪の事例

#### 3.6.1 気象と波浪の概況

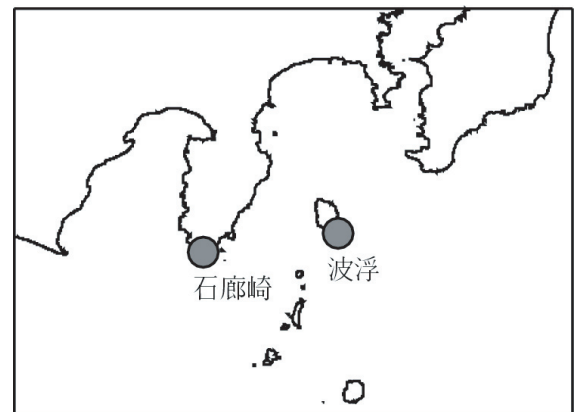
2009年10月7日に台風第18号が種子島の南海上を北北東へ進み本州へ接近した。8日5時過ぎには愛知県知多半島付近に上陸し、その後北東進した(第48図)。この台風により関東近海では大しけとなった。気象庁の石廊崎波浪計と港湾局の波浮港波浪計の設置場所を第49図に示す。

台風の接近に伴い8日10時頃、ASCATにより東海道沖で35knotの海上風が観測された(第50図)。波浮港のある大島のアメダスでは8日2時頃から風向が東よりから南よりに変わり、8時に19.2m/s(南南西)を観測した(第51図)。

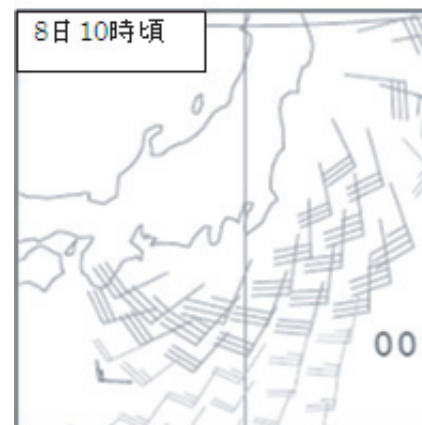
8日9時の波高分布図(第52図)では東海道沖で9mの極大域が解析されおり、波浮港付近の波高は7～8mとなっている。波浮港の波高、周期、波向の観測値を第51図に示す。7日昼以降、台風接近に伴い波高が2mから3mに上昇し、その後、8日9時に6.27mに達した。

石廊崎でも7日昼以降、波高が2mから4mに上昇し、8日6時に9.41mに達した。毎時の観測値では8日7時に10.53mを記録し、観測開始以来最大の観測波高となった。

波浮港付近(34.5N 139.5E)の波浪モデルスペクトル(7日00UTC初期値)によれば、北東、南東、



第49図 波浮港および石廊崎の波浪計設置場所



第50図 衛星による風観測値

10月8日10時頃のASCATによる海上風の観測値。風速はknot表示。

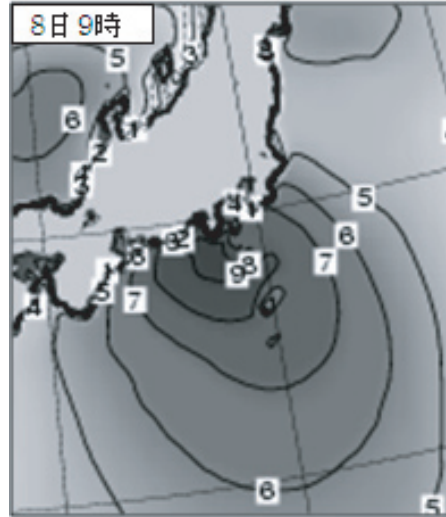


南南西からの波が予測されている (第53図)。このうち波浮港では、観測された周期と波向から、7日15時までは主に南南西からのうねり、7日

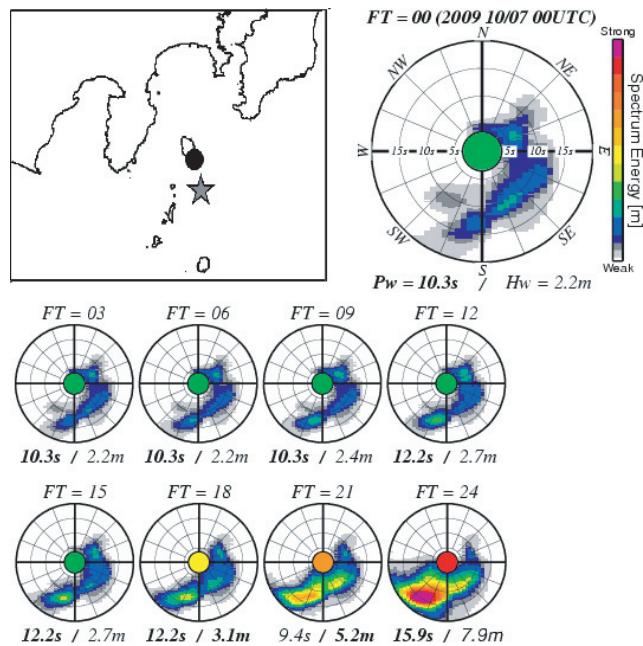
18時以降は台風の東側での南東風による風浪が卓越し、その後台風の接近に伴い南西風による風浪が卓越していたと考える (第51図)。



第51図 大島の風と波浪の観測値 (10月7日12時～8日24時)  
 (上) 大島アメダスの観測値 (風速 (m/s) 及び風向)  
 (下) 波浮港の観測値 (波高 (m), 周期 (s), 波向)



第52図 波高分布図 (10月8日9時の沿岸波浪図)



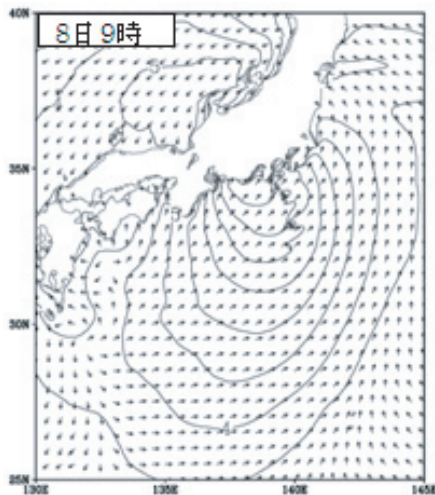
第53図 波浪モデル(7日00UTC初期値)の波浮港付近(34.5N 139.5E, 図左上の星印)におけるスペクトル予測(FT=00～24)

### 3.6.2 実況と波浪モデルの比較と誤差要因の検討

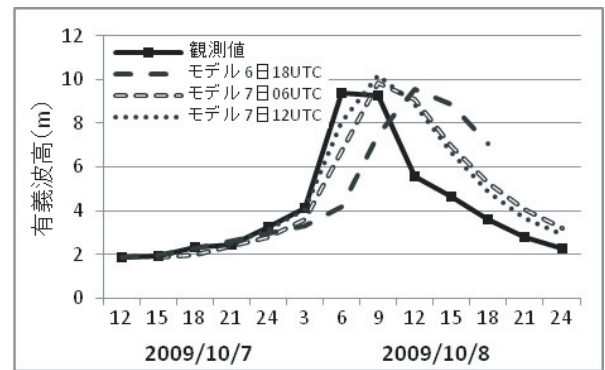
7日12UTC初期値の波浪モデルでは、8日9時に東海道沖で最大11mを予測しており、解析（東海道沖で最大9m, 第52図）よりも波高が高い（第54図）。波浮港における波浪モデルの予測値（初期時刻：6日18UTC, 7日06UTC, 7日12UTC）と観測値を第55図に示す（波浮港における波浪モデルの予測値とは、観測地点直近の格子点での予測値のことである）。8日3時までのモデルの予測値は、初期時刻に関わらず実況とおおむね良く合っている。一方、8日6時以降の風浪の強まりは、モデルの初期時刻が新しくなるにつれて早

まり、実況に近づいている。また、8日12時以降モデルの予測に比べて観測値は急速に低くなり、モデルの誤差が再び大きくなっている。石廊崎の沿岸波浪計においても同様の傾向が見られた（第56図）。

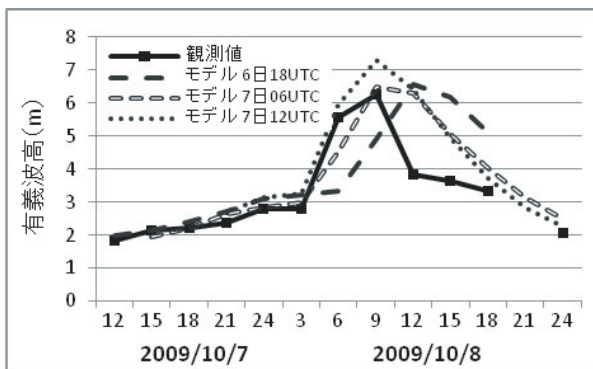
8日6時の波浪モデル（6日18UTC初期値）の誤差は、風浪の強まりのタイミングが、実況よりも遅かったために生じたものである。そこで波浮港における海上風のモデル予測を第57図に示す。初期時刻が新しくなるにつれて、8日6時頃の海上風の強まりのタイミングが早まっていることが分かる。また、風向が南よりに変わるタイミングについても同様であり、6日18UTC初期値



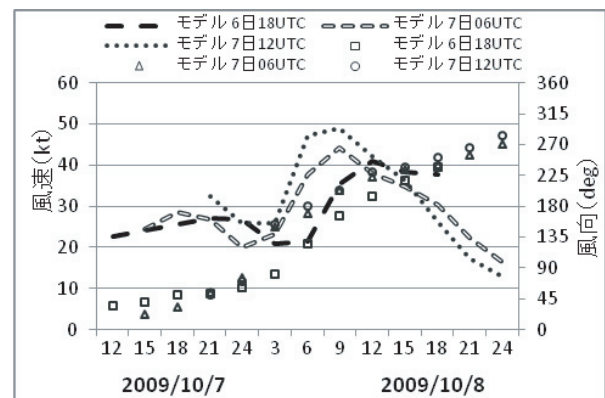
第54図 2009年10月8日9時の波浪予測  
初期時刻：7日12UTCの12時間後の予測値（波高(m), 波向）。



第56図 石廊崎の波浪の観測値と予測値  
初期時刻：6日18UTC, 7日06UTC, 7日12UTCの予測値（波高(m)）。



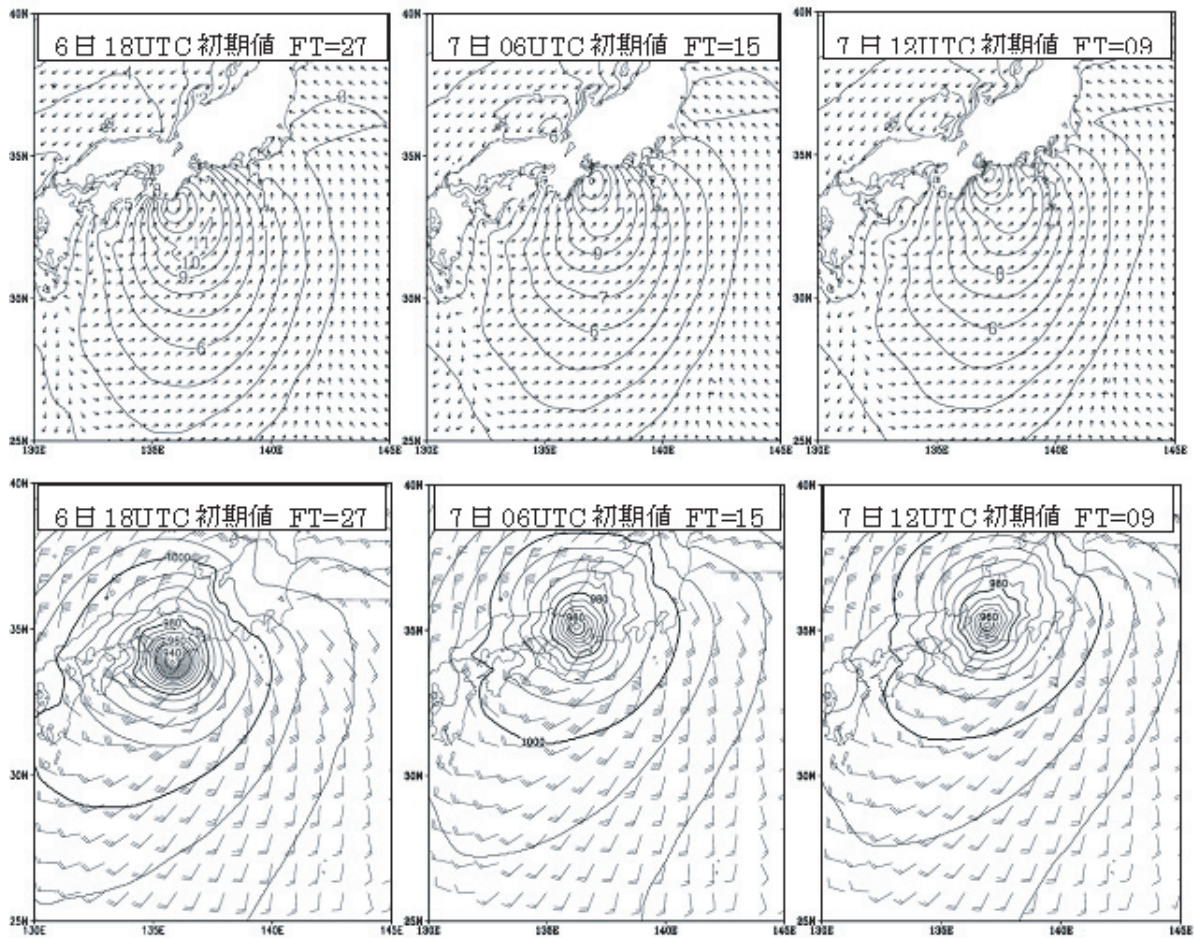
第55図 波浮港の波浪の観測値と予測値  
初期時刻：6日18UTC, 7日06UTC, 7日12UTCの予測値（波高(m)）。



第57図 波浮港における風の予測値  
初期時刻：6日18UTC, 7日06UTC, 7日12UTCの予測値（風速(knot), 風向(deg)）。

のモデルは大島アメダスの観測値（第 51 図）よりも南風になるタイミングが遅い。8 日 6 時のモデルの予測を平面図で見ると（第 58 図）、台風による風浪のピークの位置が 6 日 18UTC 初期値のモデル (FT=27) では潮岬沿岸にあるのに対し、7 日 06UTC 及び 7 日 12UTC 初期値のモデル (FT=15,09) では志摩半島沿岸にあり、初期時刻が新しくなるにつれて、風浪のピークが東にずれて

いる。これは大気モデルにおける台風の進行速度が速まったことによるものと思われる、海上風及び海面気圧の予測でも同様の傾向が見られる（第 58 図）。また、8 日 9 時における東海道沖の極大域の予測は 10m 以上である（第 54 図）のに対し、解析では 9m にとどまっている（第 52 図）。このため 8 日 12 時以降は、南西からのうねりの予測が過大になっていたと考えられる。



第 58 図 2009 年 10 月 8 日 6 時の波浪、海上風、海面気圧の予測  
 初期時刻：6 日 18UTC，7 日 06UTC，7 日 12UTC の予測値。  
 上段：波高 (m)，波向，下段：風速 (knot)，海面気圧 (hPa)。



### 3.6.3 誤差要因と解説資料の検討

本事例は、台風からのうねりと台風本体の風浪の波向がともに南よりだったため、台風接近に伴い波高が急激に増大したケースであった。波浮港付近での波浪の推移をみると、7日15時までは主に南南西からのうねり、7日18時以降は台風東側での南東風による風浪が卓越し、その後台風の接近に伴い南西風による風浪が卓越したと考えられる。石廊崎では8日6時に9.41mの波高を記録したが、石廊崎は南～南西方向に開けた地形であるため、南～南西方向からの台風のうねり及び風浪が減衰することなく達したためと考える。

また、波浮港において波浪モデルとの誤差が大きくなったのは、大気モデルの予測よりも台風の進行速度が速まり、風浪の強まるタイミングが波浪モデル(6日18UTC初期値)の予測よりも早まったことが要因と考えられる。特に台風に伴う高波高が予想される場合は、短時間に波高が上昇するため、風浪の発達タイミングのずれが大きな誤差につながる。本事例では、7日12UTC初期値のモデルのみ風浪発達のタイミングを適切に予測していた。このことは、解説資料を作成する際には、直前まで予測の修正についてコメントする余地があったともいえる。また、台風の極大域の波高の誤差は、周辺へのうねりの予測にも影響することから、実況と予測のずれを把握し、うねりの予想へ還元することが有効である。

## 4. 事例解析をもとにした解説資料作成時の留意点

各事例におけるうねりと風浪の解析結果をもとに、解説資料作成時の留意点について以下にまとめた。

### 4.1 うねり

SMB法などを用いて、衛星で観測された風などの実況値からうねりの波源域としての風浪の発達程度を把握することにより解説資料にうねりの修正量の記述が可能である。また、伝播経路での実況値を参照にして、しお波の影響や分散の効果を検討した。今後更に量的修正に向けての調査が進むことによって、コメントの充実が期待される。

なお、波浪の解説資料の主な部分はいずれにも関する解説であるが、うねりに対する概念が必ずしも統一されていないため、海洋気象情報室ではうねりの表現の指標について検討している。その要点の一つとして、予報文等にうねりを付加する場合には、その必要性や意義を認識することが重要である。

うねりについてのコメントには、うねりの要因や周期も含めることが望ましい。モデルと差が出る場合は波高の修正量を提供する必要がある。更にうねりの波源がはっきりしている場合は、その要因を記述するようにする。また、モデルの予想と実況で周期が大きく異なる場合には、なぜそうなったかをモデルの解釈という面で記述することが重要である。

### 4.2 風浪

風浪についても衛星で観測された風の実況値に注目して、コメントすることが必要である。海域特性についてのコメントの他に、波浪モデルの特性を考慮したコメント(波高の立ち上がりの遅れなど)を中心に記述することも重要である。解説資料の中で海上風の予想に関わるコメントを行うことは想定していないが、既に風・風浪ともにモデル予想と大きく異なることが明らかである等、実況データ等でモデル修正量が確実に把握できている場合においては、短期的な風浪の見通しを参考情報としてコメントすることは技術的に可能である。このような参考情報の記載の仕方について、今後とも検討を進めていくことが重要である。

解説資料は、利便性と有効性が求められている。海洋気象台と地方予報中核官署との連携を深め、今後ともよりよい情報の作成に向けた資料のあり方を検討していく必要がある。

## 5. おわりに

沿岸防災業務強化のためには、適時適切な情報提供はもちろんのこと、その土台となる基礎的な知識や技術、数値波浪モデルの特性把握、現象の解析、局地的な知見など様々な要素が関連している。また、本庁、海洋気象台、地方予報中核官署、府県予報官署それぞれの立場での寄与が考えられ

る。今回取りまとめたのは、特徴的な事例にすぎない。今後は統計的な調査等を進め、系統的な量的補正の検討につなげていきたい。なお、技術検討会では内海の特性調査も行われており、それは濱名ほか (2012) が「大阪湾と伊勢湾における波浪特性及び沿岸波浪モデルの予想特性についての調査」としてまとめている。また、今回事例解析で示した SMB 法やうねり推算の手法などは、府県予報官署でも有効に活用できる手法である。高野 (2011) を是非参照されたい。

#### 参 考 文 献

- Ueno, K. and N. Kohno(2004):The development of the third generation wave model MRI- III for operational use. in Proc. Of 8th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting,G2,1-7
- 吉田久美・三浦大輔・高野洋雄 (2012) : 沿岸波浪モデルの統計的検証と改善について. 測候時報, 79, 特別号, S73-S82.
- The WAMDI Group (1988):The WAM model-A third generation ocean wave prediction model. J.Phys. Oceanogr., 18, 1775-1810
- 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.
- 土木学会 (1971) ; 水理公式集 (昭和 46 年版) ,495
- 淵秀隆, 松本次男, 斎藤晃 (1976) : 海の波<防災と経済運行>. 地人書館, 226pp.
- Kohno, N. , D. Miura and K. Yoshita (2011) : The development of JMA wave data assimilation system. submitted to the 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting.
- 高野洋雄 (2011) : 有義波法による波浪推算 —現業での利用を目的として—. 測候時報, 78, 185-201.
- 濱名実・金子秀毅・出口英昭・東條伸・森一正 (2012) : 大阪湾と伊勢湾における波浪特性及び沿岸波浪モデルの予想特性についての調査. 測候時報, 79, 特別号, S59-S71.