

2004年に発生した台風に伴う高波の波浪特性

DISCUSSION ON THE CHARACTERISTICS OF THE WAVES CAUSED BY THE SIX TYPHOONS IN 2004 ON THE BASIS OF THE WAVE HINDCASTING WITH WAM

橋本典明¹・鈴木勝之²・永井紀彦³

Noriaki HASHIMOTO, Katsuyuki SUZUYAMA, Toshihiko NAGAI

- ¹フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院 環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
² 工修 (株) エコー 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町10-35)
³フェロー 工博 (独法) 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)

In 2004, as many as 10 typhoons hit the Japanese Islands, and caused severe damage in many places all over Japan. Among them, especially six typhoons landed from August through October, i.e., the typhoon 0415, 0416, 0418, 0422, and 0423, caused extraordinary disaster due to waves along Japanese coast. These six typhoons have the different feature in the route, the central atmospheric pressure, and the radius. Accordingly, the occurrence wave characteristics due to each typhoon are different. The wave hindcasting is a useful measure to discuss the characteristics of the waves caused by the typhoon in large area. In this paper, we, therefore, apply the third generation wave model, WAM, for the six typhoons, and discuss the characteristics of the waves as well as the wave hindcasting accuracy with WAM.

Key Words : typhoon, Wave hindcasting, WAM, ECMWF

1. はじめに

2004年は10個にも及ぶ台風が日本列島に上陸し、我が国では近年まれにみる多くの甚大な被害が発生した。その中でも8月から10月にかけて来襲した台風0415号、0416号、0418号、0421号、0422号及び0423号の6台風が日本沿岸に深刻な高波災害をもたらしたことは記憶に新しい。これら6台風は勢力や経路がそれぞれ異なっており、各台風による高波発生海域やそれらの出現特性も異なっている。このような広範囲の面的な波浪の出現特性の把握・検討には波浪推算が有用な手段である。そこで本研究では、第三世代波浪推算法を用いた波浪推算を行い、6台風来襲時における面的な波浪の出現特性及び波浪推算精度や特徴を比較・検討することにより、今後各所で行われる被災原因の究明や災害復旧等の実務における参考資料として資することを目的とする。

2. 6台風の経路

図-1に、2004年に発生した台風0415号、0416号、0418号、0421号、0422号及び0423号の6台風の経路

と最低気圧値を示す。各台風の経路上のマークは6時間毎の位置を示しており、大きいマークが各日の3時の位置である。図の下部には、台風経路の図示開始位置の日付を示している。

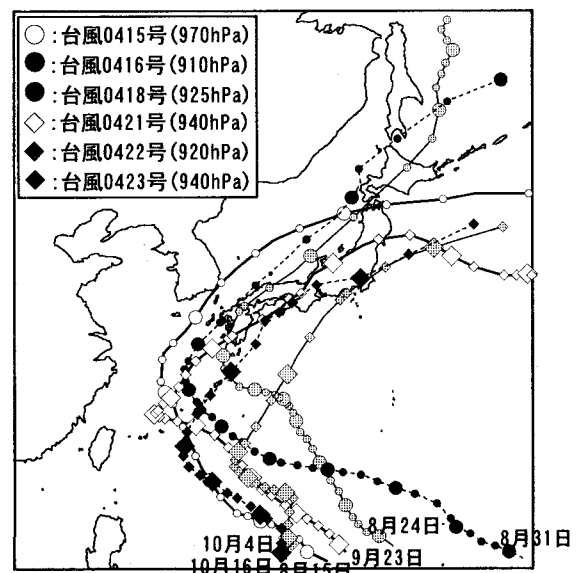


図-1 対象6台風の台風経路図

3. 計算条件の設定

(1) 計算領域と計算条件

波浪推算に際しては、ネスグリッドを用い、大領域から小領域へと地形の近似精度を上げながら計算を接続した。本研究では図-2に示すように日本列島を中心とする北緯15°～55°，東経115°～152°の範囲を大領域とし、2つの中領域（西日本，東日本）及び小領域（九州，北海道）を設定した。小領域では約3 km (1/32°) 格子を使用することで精度良い推算を実施した。本研究では、各領域とも水深は考慮していない。各計算領域で設定した計算諸条件を表-1に示す。なお本研究では、既往研究の成果¹⁾から、風から波へのエネルギー輸送量の計算には、WAM Cycle3で採用されたWuの式を、また単位時間当たりのエネルギーの増分に上限を設けるリミターと呼ばれるパラメータには、Hersbach and Janssen²⁾により提案されたりミターを用いることとした。

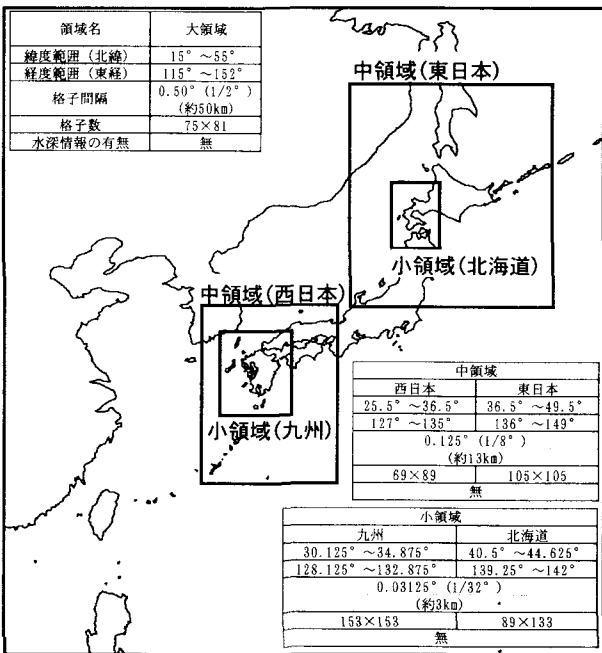


図-2 計算領域

表-1 各領域の計算条件

領域名		大領域	中領域		小領域	
時間ステップ			西日本	東日本	九州	北海道
		600(sec)	120(sec)		60(sec)	
入力風の時間ステップ		1時間				
スペクトル 分割	周波数領域 (対数間隔)	0.021(Hz)～1.377(Hz)				
	対応周期領域	0.73(s)～46.65(s)				
	周波数分割数	45				
	方向分割数	32 (Δθ=11.25°)				
出力時間ステップ		1時間				

(2) 波浪推算の外力条件

外洋波浪推算では、波浪推算の外力条件である海上風データとしては、ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts) 等の気象予報を担

務する機関から提供される気象客観解析データを用いることが多い。しかし、波浪災害発生時などの急務では、いまだ台風モデルと傾度風モデルを結合したハイブリッドモデルにより推算される海上風データを用いることが一般である。そこでこのような背景から、本研究では、台風影響圏内と圏外の気圧を滑らかに接続するハイブリッドモデルと、風速と緯度に依存して自由大気の風を海上風へ変換する境界層モデルを適用して海上風を推算することとした。なお、本研究におけるハイブリッドモデルと境界層モデルは、後藤・柴木 (1993)³⁾にならう。ハイブリッドモデルへの入力データは、1日4時刻 (3時, 9時, 15時, 21時) のアジア太平洋天気図中の等圧線を、デジタイザーを用いて読み込み、スプライン補間により平面的な気圧データにした結果を用いる。また、3時, 9時, 15時, 21時の各時刻間の気圧データは、4時刻の気圧データを用いた時間内挿により補間を行う。

4. 推算精度の検証

(1) 海上風推算精度の検証

本研究で小領域として設定した九州及び北海道領域では、NOWPHASや国・地方自治体等によって数地点の風観測が実施されている。本研究では、それらの風観測地点で取得された観測風を入手し、推算海上風と比較することにより、推算海上風の精度検証を行う。図-3は九州及び北海道沿岸において顕著な高波が発生した台風0418号時の宮崎 (九州領域) と瀬棚 (北海道領域) における風速・風向の比較図である。推算海上風は1時間毎 (推算値保存間隔)、観測風は観測時間間隔である1時間毎 (宮崎) 及び2時間毎 (瀬棚) に風速・風向を図示している。図中の○が観測風速、太線が推算風速を表す。また図上段の「OBS. WIND DIRECTION」が観測風向を、「WCT WIND DIRECTION」が推算風向を表す。ここで風向は、基準線に対して上から下向きに描かれた線は風向Nを表している。推算海上風と観測風を比較する場合、観測風を推算海上風 (10m高度風) と同高度の風に変換する必要がある。そこで本研究では、1/7乗則 ($U_{10} = U_{OBS} (10.0/h)^{1/7}$) を用いて観測風の高度補正を行った。ここで、 U_{OBS} は観測風、 U_{10} は10m高度風に変換された観測風、 h は観測高度である。図より、推算海上風の変動傾向及び最大風速発生時付近の風速、風向は、観測風と概ね良好な対応を示していることがわかる。ただし、宮崎で見られるような、3日～4日の風向及び5日～7日の風速の不一致は、観測風が観測機器周辺の陸上地形の影響を強く受けた局所的な風であることが原因であろうと推察される。ここでは、宮崎と瀬棚の比較結果のみを例示したが、その他の地点においても、各台風における推算海上風と観測風の比較結果は概ね良好であることから、本研究における推算海上風が波浪推算の外力条件としてほぼ適切であることが確認された。

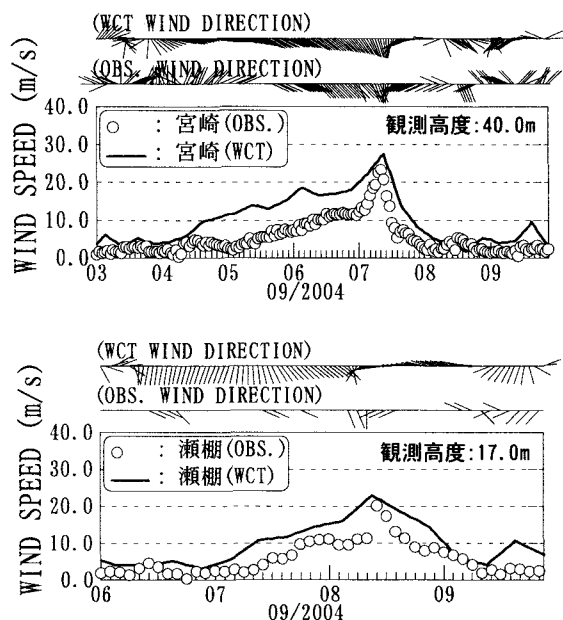


図-3 推算海上風と観測風の比較

(2) 波浪推算精度の検証

各台風における推算海上風を外力条件として、第三世代波浪推算法WAMを用いた波浪推算を行い、その結果を基に推算精度の検証を行った。図-4に九州及び北海道沿岸において顕著な高波が発生した台風0418号時の解析結果を例示する。ここに示す検証地点は、九州西岸の伊王島、東岸の細島、内湾域の苅田と北海道西岸の瀬棚である。推算値は1時間毎、観測値は観測間隔である2時間毎に有義波高、周期、波向を図示している。図中の○が観測波高、△が周期を表し、太線が推算波高、細線が周期を表す。また図上段の「WCT WAVE DIRECTION」が推算波向を、「NOWPHAS WAVE DIRECTION」が観測波向を表す。ここで、波向は基準線に対して上から下向きに描かれた線は波向Nを表している。図中の地点名に併記した数値は観測機器設置水深である。図より、瀬棚においては推算波高が観測波高を若干過小評価しているものの、他の地点では観測値を概ね精度良く再現していることがわかる。

しかし、本研究で実施した6台風の波浪推算結果をさらに詳細に検討すると、いくつかの事例や観測地点において、実務で要求されるレベルで、必ずしも十分に実際の波浪の出現特性を再現できていないことがあることが判明した。例えば、九州沿岸では、外洋に面する沿岸、島の遮蔽の影響を受ける沿岸、あるいは内湾等の様々な地形で形成されている。外洋に面する地点の推算結果は概ね許容範囲の精度であったが、複雑な陸域周辺海域では精度不足のケースが散見された。これまでの多くの波浪推算調査は、主として外洋を対象としており、このような様々な地形条件を有する各所の波浪推算精度を詳細かつ総合的に検討した例は少なく、その知見は不十分である。これに関しては、今後の課題である。

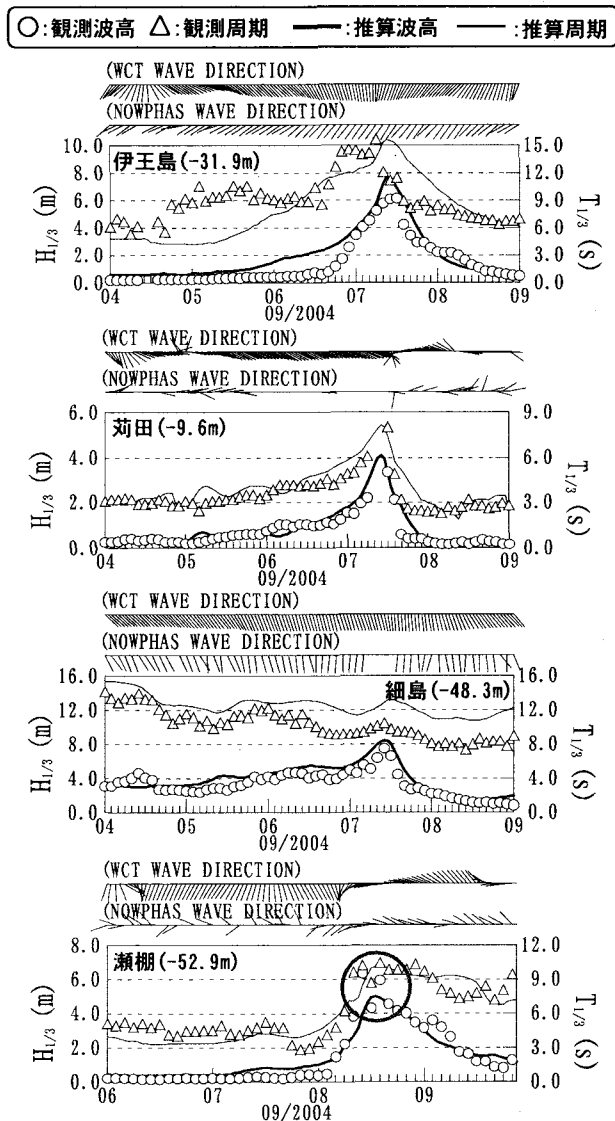


図-4 波浪推算値と波浪観測値の比較

5. 各台風時の波浪特性に関する検討

(1) 面的な波浪特性の検討

図-5は、日本周辺海域（大領域）における各台風の最大波高の平面分布を等値線により図示したものである。図中には台風経路を3種類の大きさの○で表している。一番大きく、中に数値（日付）が記載されている○が各日の0時、2番目の大きさの○が各日の12時、一番小さい○が1時間毎の台風中心位置である。これらの推算結果やNOWPHASの観測結果等を用いて、各台風に伴う高波時の波浪の出現特性の検討を行う。

a) 台風0415号の波浪特性

図より、沖縄の南海上から東シナ海にかけての海域が台風の危険半円内になり、波高が大きい海域が見られる。また日本海では、他の台風と比較して高波浪の海域が広がっていることが特徴的である。NOWPHASでも酒田や秋田等で高波が観測され、き

わめて短時間に波が発達する特性が見られた。例えば、酒田では20日2時から4時にかけて有義波高が3mから8mまで一気に増大したことが観測されている。これは、台風が比較的速い速度で日本海を北東進したことと、それに伴う風向の急変が原因であると考えられる。すなわち、対象地点周辺において、台風の接近に伴う陸から海への風向であったものが、台風の進行に伴い海から陸への風向に急転することで、急速に波が発達したと考えられる。日本海沿岸におけるこのような現象は、波浪推算においても精度良く再現されていることを確認した。

b) 台風0416号の波浪特性

図からもわかるように、この台風で顕著な高波の影響を受けたのは九州東岸から西日本の太平洋沿岸である。特に細島港の灯台の破壊等、九州東岸における高波は顕著であった。この台風による波浪の特徴は、台風が太平洋を北西に進むのが比較的ゆっくりで、うねりが発達したことにより、高波期間が比較的長かったことが挙げられる。波浪推算結果からも、細島では4日間以上かけて4m～11m程度へ波浪が発達することが確認できた。また、九州東岸全域においても同様な傾向が見られた。なお、図中の丸枠で囲った箇所は台風0418号による高波である。

c) 台風0418号の波浪特性

この台風は他の台風と比較して、薩南諸島、九州、西日本や日本海及び北海道と、高波の影響がほぼ全国沿岸に及んだことが特徴である。図より、他の5台風と比較して、日本沿岸の広い範囲で高波が発生していることがわかる。九州では、台風が薩南諸島の西方約300kmを通過し、長崎県を通過したことから、その全域が台風の危険半円内に入り、顕著な高波が発生した。また、北海道において台風が再発達し、それに伴って顕著な高波が発生したことも特徴である。

d) 台風0421号の波浪特性

この台風に伴う波浪は、他の5台風と比較して、我が国本土では特筆するような高波はもたらされていない。しかし、沖縄本島を回り込む鋭角な変曲を伴う進路をとり、特に変曲点付近で停滞したため、南西諸島の東シナ海で高波が発生した。図からもその様子がわかる。この台風により、中城湾では7.21mの波浪が観測されている。

e) 台風0422号の波浪特性

図より、この台風による高波は他の5台風と比較して、日本沿岸への影響範囲が狭かったことがわかる。この台風により、関東の太平洋側に高波の影響があったものの、台風の進行速度が速かったため、高波浪の継続時間は比較的短く、急激に波浪が発達したが、減衰も速かったことが特徴である。

f) 台風0423号の波浪特性

この台風は、影響範囲が広く、北海道を除く全国沿岸で高波が発生した。図より、特に太平洋沿岸において高波浪海域が見られ、NOWPHASでも室津港沖の水深27mで、有義波高13.55m、周期15.8sが観測された。また、台風の可航半円に位置する日本海においても顕著な高波が発生した。対象6台風の中で類似した台風経路である台風0421号の最大波高分布と比較すると、1m～2m程度の差が見られる。

g) 台風0418号時の津軽海峡周辺海域の波浪特性

図-6は台風0415号、0416号、0418号時の津軽海峡の最大波高分布を示すものである。函館港では台風0418号時の高波浪により島防波堤に甚大な被害を受けている。図より、台風0415号時にも津軽海峡への高波の入射があるものの、台風0418号時には、台風0415号時より若干北よりの波向で5.0m程度の高波浪が入射している様子がわかる。この結果、函館港に高波が侵入し、被害が発生したと考えられる。このように、波浪推算より得られる面的な波浪場から、各台風時の波浪特性を詳細かつ明確に把握することが可能となる。

(2) 急激な波浪の発達に関する検討

台風0416号や台風0418号来襲時には、玄界灘や留萌、瀬棚等のNOWPHAS観測地点において、これまでの観測ではあまり見られなかった短時間の急激な波浪の発達を観測された。本研究ではこのような現象に対して、観測及び推算から得られた方向スペクトルを用いて比較・検討を行った。図-7は、留萌における方向スペクトルの解析結果から得られた周期帯別波高・波向の経時変化図である。図中の○が観測波高、△が周期を表し、太線が推算波高、細線が周期を表す。図上段の「NOWPHAS WAVE DIRECTION」が観測された周期帯毎の波高・波向を、「WCT WAVE DIRECTION」が推算された周期帯波高・波向を線の長さでベクトル表示したものである。ここで波向は、基準線に対して上から下向きに描かれた線は波向Nを表している。

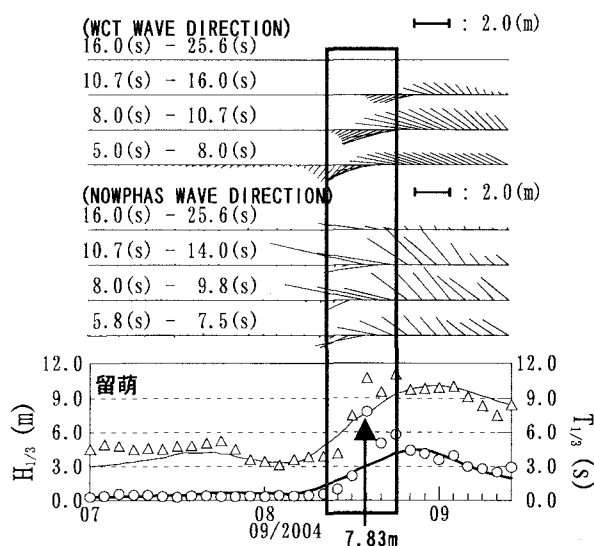
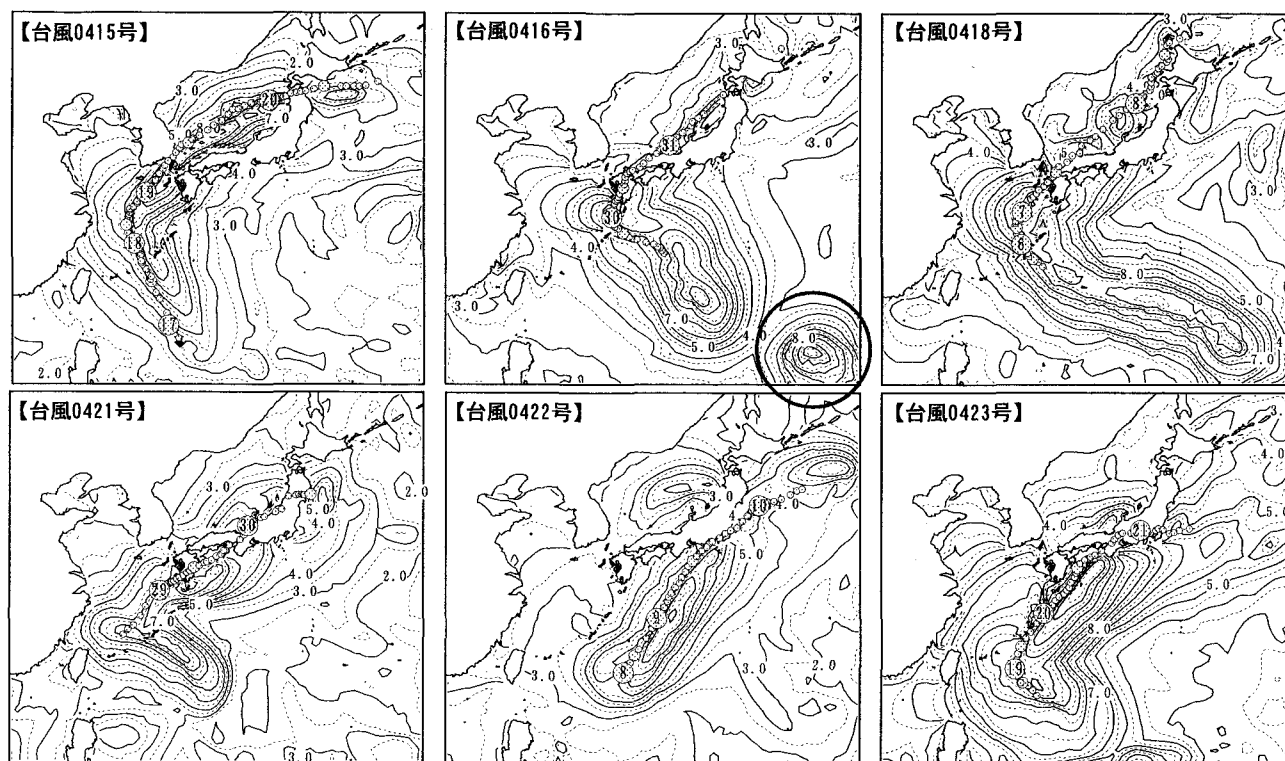
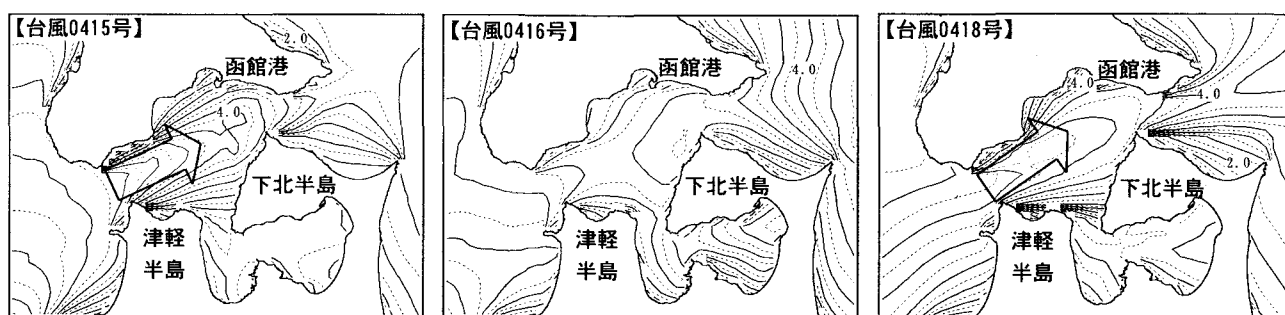


図-7 急激な波浪発達期間における周期帯別解析



図－5 6台風来襲時の日本周辺海域の最大波高分布



図－6 津軽海峡周辺海域の最大波高分布（台風0415号，台風0416号，台風0418号）

まず図の観測結果を見ると，最大有義波高7.83mが発生した8日14時の4時間前には有義波高が1m以下であったことから，きわめて急速に波浪が発達したことがわかる．また，図中の四角枠で囲った期間の周期帯毎の波高を見ても，12時の段階で周期10s以下のエネルギー成分の発達から始まり，14時には周期10s以上のエネルギー成分も急速に発達している．次に推算結果を見ると，有義波高の比較及び周期帯毎の波高からも明らかなように，推算では8日12時から14時にかけての周期10s以上の急激なエネルギー成分の発達が再現されていない．この他にも，このような短時間の急激な波浪の発達が，玄海灘や瀬棚等いくつかの地点で観測されており，いずれも波浪推算においては再現が困難であった事例である．したがって，今後このような現象の発生機構を，気象との関連において詳細に検討していくことが必要になると考えられる．

(3) 風データと海域の違いによる波浪推算精度の検討

波浪推算の推算精度は外力条件となる海上風の推算精度に大きく依存する．また，例えば九州沿岸に見られるように地形の多様性がある場合には，推算海域によっても推算精度は異なってくる．したがって，風データや推算海域の違いによる波浪推算精度を把握しておくことが必要である．近年，ECMWFや気象庁等から提供される高精度で高分解能な気象客観解析データを，波浪推算の外力条件として用いる検討も幾つかなされている．そこで本研究では，ECMWFより提供される10m高度風を用いた波浪推算を実施し，ハイブリッドモデルによる推算海上風を用いた波浪推算結果と比較することにより，風データ及び海域の違いによる波浪推算精度の検討を行った．本研究の波浪推算では，風から波へのエネルギー輸送量の計算に，WAM Cycle3で採用されたWuの式を用いたが，ECMWFの風データを用いる場

合は、この風データをデフォルトの外力条件として改良されたWAM Cycle4を用いることにした。WAM Cycle4では、Janssenのquasi-linear理論^{4) 5)}を導入することにより、風から波へのエネルギー輸送の計算に波齢の影響を考慮できるようにしている。図-8に、外洋域及び内湾域の代表地点として細島及び荇田における2種類の風データを用いた波浪推算結果を示す。図中の○が観測波高、周期を表し、太線がハイブリッドモデルの推算海上風を用いた推算波高と周期（以降、ハイブリッド推算波浪と呼ぶ。）を、細線がECMWFの風データを用いた推算波高と周期（以降、ECMWF推算波浪と呼ぶ。）を表す。また、「NOWPHAS WAVE DIRECTION」が観測波向を、「WCT WAVE DIRECTION」がハイブリッドモデルの推算海上風を用いた推算波向を、「ECMWF WAVE DIRECTION」がECMWFの風データを用いた推算波向をそれぞれ表す。ここで波向は、基準線に対して上から下向きに描かれた線が波向Nを表している。

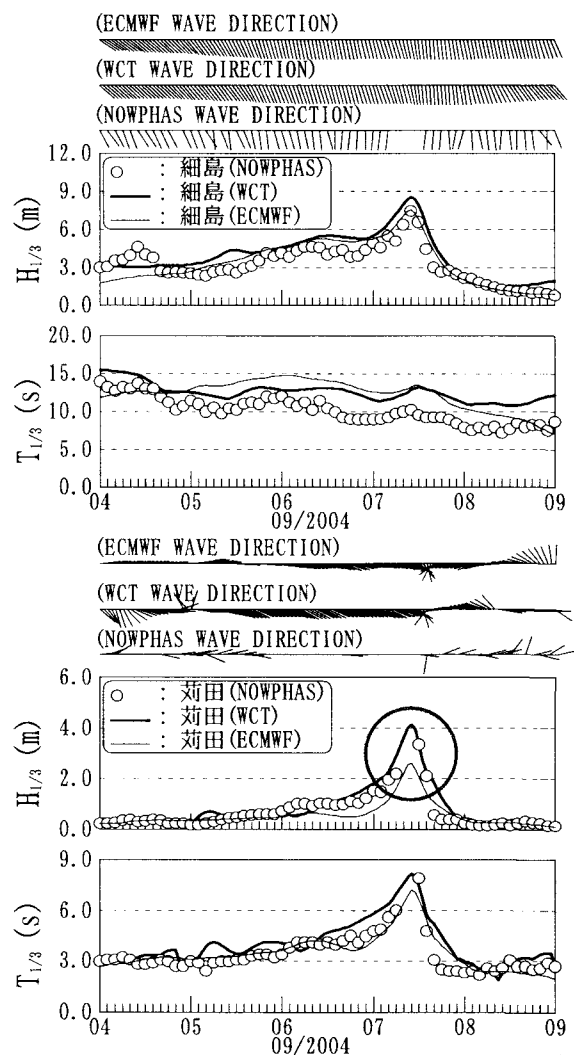


図-8 風データと海域の違いによる波浪推算結果の違い

図-8上段の細島について見ると、ハイブリッド推算波浪及びECMWF推算波浪ともに観測値をよく

再現しており、風データの違いが波浪推算精度に及ぼす影響は小さい。外洋域を対象としたECMWF推算波浪の精度については、既往の研究^{6) 7)}でもすでにその推算精度が確認されている。しかし、荇田を対象とした推算結果を見ると、ハイブリッド推算波浪が観測値をよく再現しているのに対し、ECMWF推算波浪は過小評価となっている。これは、ECMWFの風データが 0.5° 間隔で提供されていることから、荇田のような内湾域では地形近似精度が荒く、十分な精度の風データを提供できていないことが原因と考えられる。これらのことから、風データや推算海域の違いによって波浪推算精度に大きな違いが生じることが再確認できた。

6. おわりに

本研究では、2004年の6台風来襲時における日本周辺海域の面的な波浪の出現特性や波浪推算精度をそれぞれ比較・検討した。その結果、それぞれの台風における波浪の出現特性を明らかにするとともに、このような広範囲の面的な波浪の出現特性を把握・検討する場合には波浪推算が有用な手段となることを再確認することができた。

また、6台風来襲時に発生した高波の中には、これまで観測されることの少なかった短時間の急激な波浪の発達を確認され、波浪推算ではこの現象を再現することが困難であることがわかった。したがって、今後このような現象の発生機構を、気象との関連において詳細に検討していくことが必要であろう。

謝辞：本研究では、波浪推算の実施に際し、ECMWFから提供された海上風の客観解析データを使用した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 橋本典明・川口浩二・池上正春・鈴山勝之(2004)：東京湾におけるWAMの波浪推算特性に関する検討，海洋開発論文集，Vol.20，pp.845-850
- 2) Hersbach, H. and P. A. E. M. Janssen (1999): Improvement of the short fetch behavior in the WAM model, J. Atmospheric and Oceanic Technology, 16, pp.884-892.
- 3) 後藤智明・柴木秀之 (1993)：陸上地形の影響を考慮した海上風推算，港湾技術研究所報告，第32巻，第3号，p.65-97.
- 4) Janssen, P. A. E. M. (1989): Wave-induced stress and the drag of air flow over sea wave, J. Phys. Oceanogr., 19, p.745-754.
- 5) Janssen, P. A. E. M. (1991): Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, J. Phys. Oceanogr., 21, p.1631-1642.
- 6) 川口浩二・橋本典明・鈴山勝之(2002)：波浪推算に基づく日本沿岸波浪の出現特性について，海岸工学論文集，第49巻，pp.216-220.
- 7) 橋本典明・鈴山勝之・永井紀彦(2004)：ECMWF風 (Operational data, ERA15, ERA40) による長期波浪推算精度の検討，海岸工学論文集，第51巻，pp.201-205.