

様々な地形条件下における波浪推算の精度向上の ための幾つかの検討

鈴山勝之*・橋本典明**・永井紀彦***・吉田秀樹****

2004年に発生し我が国沿岸に甚大な高波被害をもたらした台風0415号, 0416号, 0418号, 0421号, 0422号及び0423号の6台風について, 多様な地形条件を有する九州沿岸を対象とした波浪推算を行い, 推算精度の検討のみならず, 各所の波浪推算精度を向上させるための幾つかの検討を行った。その結果, 波浪推算時に設定する計算条件である方向スペクトルの周波数分割数と方向分割数の違いが, 推算精度に大きな影響を及ぼすことを再確認した。特に九州沿岸のような, 岬や島が多数存在するような複雑な地形条件を対象とした波浪推算を行う場合, 方向分割数の違いが周波数分割数よりも大きな影響を及ぼす。また, 陸地と陸地に挟まれた狭い海域においては, マスコモデルにより局所的な風場を再現することで, その海域の波浪推算精度を合理的に向上できることを再確認した。

1. はじめに

近年, 第三世代波浪推算法 WAM を利用して, 外洋のみならず内湾域も対象とした様々な検討が行われ, 推算精度の向上が図られてきた。そんな中, 2004年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台風は, 我が国沿岸において近年まれにみる多数の甚大な高波被害をもたらした。被害を受けた各所では, WAM を利用した波浪推算を行い, 被災原因の究明や災害復旧のための外力条件等が検討された。九州沿岸域も例外ではなく, 沿岸全域を対象として WAM を用いた波浪推算が行われた。その結果, これまでの研究によって推算精度の向上が図られ, 既に実務に用いられている現在の WAM の計算条件では, 今回の各地の波浪状況を必ずしも十分に再現できない場合があることが確認された。その要因の一つに, 九州沿岸の地形の多様性がある。すなわち, 九州沿岸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。これまでの波浪推算に関する調査では, 規模やコースが異なる幾つかの台風を対象として, 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, その知見も不十分である。

そこで本研究では, 多様な地形条件を有する九州沿岸を対象として, 推算精度の検討のみならず, 各所の波浪推算精度を向上させるための幾つかの検討を行った。本研究では, これらの検討により得られた知見を報告し, 今後全国各所で行われるであろう波浪推算の実務に資することを目的とする。

2. 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, ネステッドグリッドを用い, 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-1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, 中領域及び小領域を設定した。小領域では約3 km (1/32°) の格子を使用することで精度の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, 橋本ら (2004 a) の既往研究の成果から, 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, 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・Janssen (1999) により提案されたリミターを用いることとした。

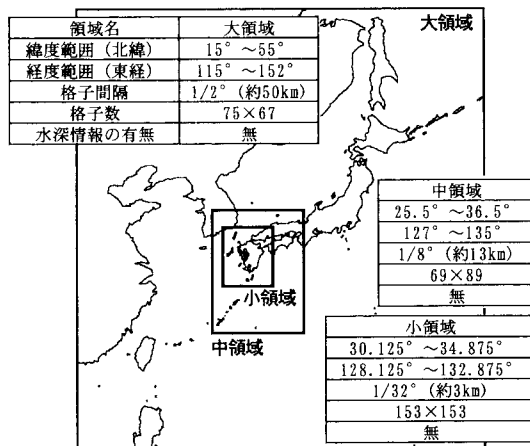


図-1 波浪推算領域

* 工修 (株)エコー環境水工部
** 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
*** フェロー 工博 (独法)港湾空港技術研究所 海象情報研究室長
**** 正 会 員 工修 国土交通省 下関港湾空港技術調査事務所長

表-1 各領域の波浪推算条件

領域名		大領域	中領域	小領域
時間ステップ		600(s)	120(s)	60(s)
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)～46.63(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

我が国において実務の波浪推算時に一般的に用いられる海上風データは、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る推算海上風である。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)にならった。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た。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った。さらに近年の研究では、外洋を対象とした波浪推算において、ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts) 等の気象予報を実施する機関から提供される気象客観解析データも多く用いられている。そこで本研究では、ECMWF から提供される海上風を用いた波浪推算も実施した。

3. 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-2 に、九州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、外洋域及び内湾域の代表地点として細島及び荻田である。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、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-2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いる。一方、荻田を対象とした推算結果を見ると、図中丸枠で示すように、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、荻田のような内湾域では地形近似精度が粗く、十分な精度の風データを提供できないことが原因と考えられる。すなわち、外洋域を対象としたECMWF 推算波浪の精度については、橋本ら(2002, 2004b)等の既往の研究でもすでにその推算精度が確認されているものの、内湾域では推算精度が不足することが再確認された。

なお、その他の台風及び観測地点における検証結果か

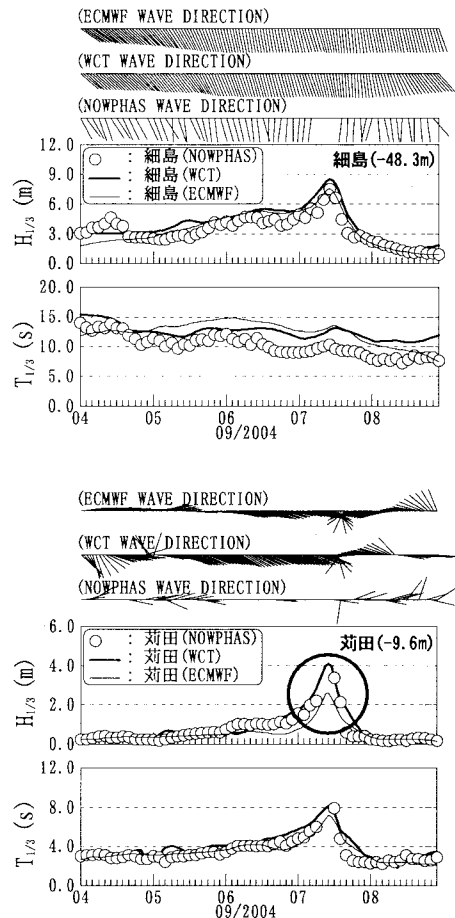


図-2 波浪推算値と波浪観測値の比較

ら、ハイブリッド推算波浪は外洋域及び内湾域とも概ね観測値を精度良く再現し、推算精度は妥当であった。

4. 計算条件が推算精度に与える影響

本研究の波浪推算時に設定した計算条件は、様々な台風による高波浪時の周波数成分に対応でき、地形による遮蔽効果の影響等を詳細に考慮できるように、周波数分割数 45 (0.021 Hz~1.377 Hz (対応周期: 0.73 s~46.65 s)), 方向分割数 32 (11.25° 間隔) と設定した。しかし、現在実務に用いられている WAM の計算条件は、計算時間及び方向スペクトルの情報量と記憶媒体の容量の制約等から、周波数分割数 35 (0.042 Hz~2.021 Hz (対応周期: 0.49 s~23.94 s)), 方向分割数 16 (22.5° 間隔) と設定する場合が多い。しかしこの計算条件では、本研究のように、規模やコースが異なる幾つかの台風を対象とする場合、九州沿岸に見られる、岬や島が多数存在するような複雑な地形条件下では、その間から入射するうねりの波向を十分に再現できない場合があると考えられる。そこで本研究では、計算条件の違いが波浪推算精度に及ぼす影響を検討するため、周波数分割数及び方向分割数が異なる 4 種類の計算条件による波浪推算を行い、それらの結果を比較・検討した。表-2 に、本研究において検討した 4 種類の計算条件を示す。本研究の波浪推算で設定した計算条件は Case1 に対応し、現在実務で実施されている波浪推算で一般的に設定されている計算条件は Case4 に対応する。Case4 の周波数領域は、Case1 より低周波数 (長周期) 側が若干狭く、方向分割についても粗い設定になっている。Case2 は Case4 の方向分割数を 16 から 32 に拡張したものであり、Case3

は Case4 の周波数分割数を 35 から 45 に拡張し、より低周波数 (長周期) 側のエネルギー成分を考慮できるように拡張したものである。

表-2 に示す 4 種類の計算条件について波浪推算を行い、その結果を基に、計算条件の違いが波浪推算結果に及ぼす影響について検討した。図-3 は表-2 に示す計算条件毎に、計算条件の違いによる推算結果の違いが顕著に表れる 9 月 7 日 13 時の波高分布を示したものである。周波数分割数の違いによる相違を検討するため、Case1 と Case2 及び Case3 と Case4 をそれぞれ比較すると、周波数分割数の違いによって波高分布に大きな差は見られない。一方、方向分割数の違いによる相違を検討するため、Case1 と Case3 及び Case2 と Case4 をそれぞれ比較する。図中丸枠で示すように、方向分割数 16 の Case3 と Case4 では、五島列島と平戸島の間から入射・伝播するうねりにより、対馬の西岸と東岸の 2 方向に周辺海域より波高が高い海域が見られる。これに対して、方向分割数 32 の Case1 と Case2 では、対馬の南岸に向う 1 方向で周辺海域より波高が高い海域が見られる。これらの結果から、このような海域では周波数分割数の違いよりも方向分割数の違いが波浪推算結果に及ぼす影響が大きいことが確認できる。図-4 は、図-3 で示した五島列島と平戸島の間から入射・伝播するうねりの影響を受ける厳原港を対象として、計算条件の違いによる推算値 (波高, 周期, 波向) の相違を比較したものである。図より、周波数分割数の違いによる波高値の差は 5~10 cm 程度、方向分割数の違いによる波高値の差は 30 cm 程度となっており、スペクトル分割数が最も粗い設定となる Case4 と最も細かい設定となる Case1 の推算値の差は約 40 cm 程度となる。以上の結果から、九州沿岸に代表されるような、岬や島が多数存在するような複雑な地形条件を対象とした波浪推算を行う場合は、方向分割数を大きめに設定することが望ましいと考えられる。また、台風に伴って、設定した周波数の範囲を越える長い周期のうねりが発生する場合には、方向スペクトルの低周波数 (長周期) 側に大きめの不合理な値が推算される場合があるこ

表-2 比較・検討する波浪推算条件

Case No.	分割数		周波数領域 (対数間隔)	方向分割角度
	周波数	方向		
Case1	45	32	0.042(Hz)~2.021(Hz)	11.25°
Case2	35		0.021(Hz)~1.377(Hz)	
Case3	45	16	0.042(Hz)~2.021(Hz)	22.50°
Case4	35		0.021(Hz)~1.377(Hz)	

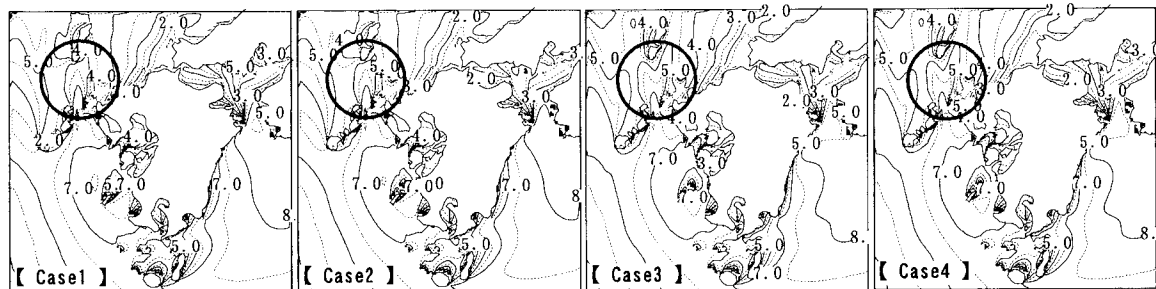


図-3 計算条件の違いによる波浪推算結果の相違

とから、周波数分割数も大きめに設定し、周波数領域を低周波数（長周期）側に拡張することが望ましいと考えられる。

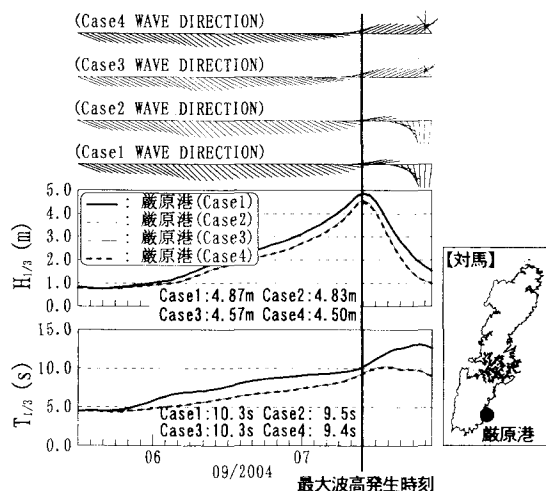


図-4 計算条件の違いによる波浪推算結果の相違（厳原港）

5. マスコンモデルによる海上風の修正

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、いくつかの事例や地点において、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場合があることが判明した。特に複雑な陸域地形を有する周辺海域では、精度不足のケースが散見された。台風0423号来襲時における姫島港もその一例である。姫島港は図-5に示すように、国東半島と姫島に挟まれた狭い海域に位置し、陸地の影響を強く受ける局所性の強い風場になることから、波浪も周辺地形の影響を受けやすく、波浪推算の精度不足が生じやすい地点である。

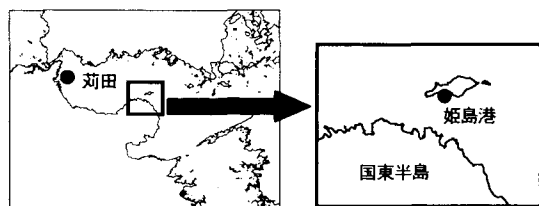


図-5 姫島港の周辺地形

姫島港では、台風0423号来襲時に目測により4m程度の波高が観測されているが、本研究の外力条件であるハイブリッドモデルによる推算海上風（以降、ハイブリッド風と呼ぶ。）を用いた波浪推算では、観測波高の半分程度の波高しか得られなかった。そこで本研究では、地形の影響（標高）をより正確に考慮するため、ハイブ

リッド風をマスコンモデルを用いて修正し、この風（以降、マスコン風と呼ぶ。）を外力条件として波浪推算を行い、マスコンモデルの導入による風場の違いが波浪の推算精度の向上に及ぼす影響を検討した。マスコンモデルを用いるに際しては、標高0～1000mを20m間隔で51層、1000m～1500mを50m間隔で10層の計61層の標高情報を作成した。図-6は、台風0423号が種子島に最接近した10月20日6時のハイブリッド風とマスコン風の風速ベクトルを比較したものである。図より、ハイブリッド風をマスコンモデルで修正することにより、特に、内湾域である有明海や八代海、周防灘や伊予灘、鹿児島湾において風速・風向が大きく変化する結果が得られた。

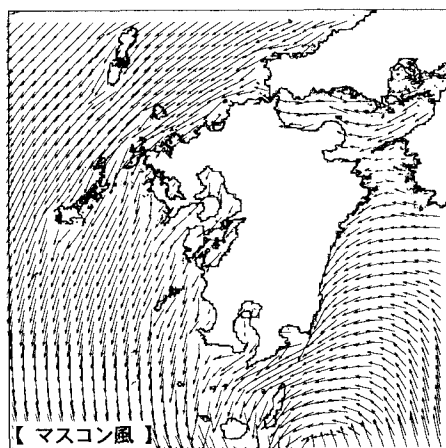
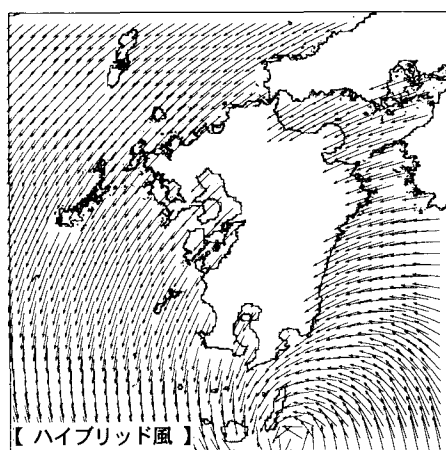


図-6 ハイブリッド風とマスコン風の風場の比較

図-7は、姫島港及びNOWPHAS波浪観測地点である苅田におけるハイブリッド風とマスコン風による波浪推算結果の比較を示したものである。図中の太線がマスコン風、細線がハイブリッド風による波浪推算結果を表し、○印がNOWPHAS観測地点で観測された有義波高

と周期を表す。また図上段に、「NOWPHAS WAVE DIRECTION」として観測波向を、「MASCON WAVE DIRECTION」としてマスコン風による推算波向を、「WCT WAVE DIRECTION」としてハイブリッド風による推算波向を示している。ここで波向は、基準線に対して上から下向きの線が波向 N を表している。

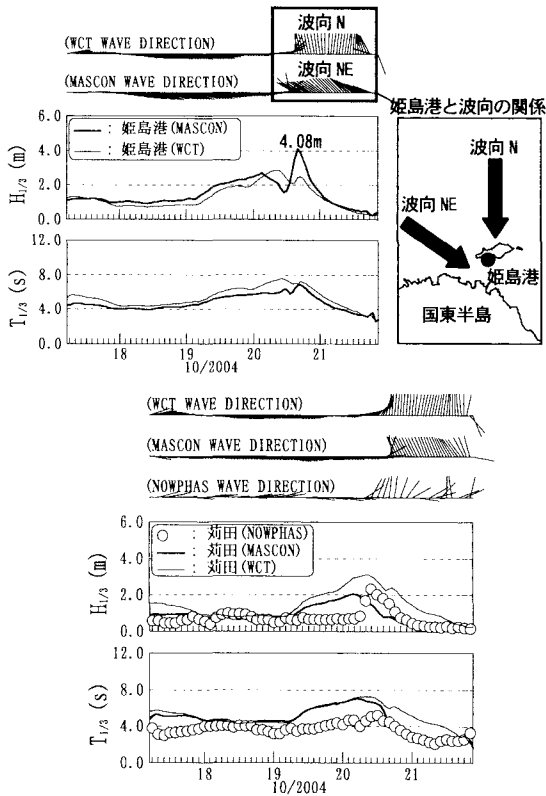


図-7 ハイブリッド風とマスコン風の波浪推算結果の比較

図-7に見られるように、ハイブリッド風を用いた波浪推算では、姫島港及びその周辺海域の波向は N となっている。この波向では島の裏側に位置する姫島港は卓越した波浪に対して遮蔽域となる。一方、マスコン風を用いた波浪推算では、姫島港及びその周辺海域の波向は NE となる。この波向では、フェッチが長くある程度発達した波浪が姫島と国東半島の間の狭い海域に北西から入射し、その結果姫島港における波浪が大きくなる。本研究では、マスコン風による波浪推算を行うことにより、姫島港で最大有義波高 4.08 m, 周期 6.8 s が得られた。これはハイブリッド風を用いた結果よりも最大有義波高値で 1 m 程度高い値となる。このように、陸地と陸地に挟まれた狭い海域に位置し、局所的な地形の影響を顕著に受ける地点では、マスコンモデルにより局所的な風場を考慮することが、波浪の推算精度を向上させる有用な方法であることが再確認された。なお、菊田では、マ

スコン風による波浪推算結果が、観測値及びハイブリッド風による波浪推算結果よりも若干過小評価する結果となっている。一般的にマスコン風はハイブリッド風と比較して風速が全体的にやや小さくなる傾向があるが、本研究のマスコン風においてもこの傾向が見られ、周防灘海域において全体的に風速がやや小さくなった。これが、菊田においてマスコン風による波浪推算結果が過小評価された原因であろうと考えられる。

6. おわりに

本研究では、2004年に発生し我が国沿岸に甚大な高波被害をもたらした 6 台風について、多様な地形条件を有する九州沿岸を対象とした波浪推算を行い、推算精度の検討のみならず、各所の波浪推算精度を向上させるための幾つかの検討を行った。以下に主要な結果を示す。

- ① 各台風時の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値は、概ね観測値を精度良く再現し、推算精度は妥当であった。また、台風時の海上風に ECMWF 風を用いる場合には、特に内湾域において波浪推算値が過小評価される傾向が見られた。
- ② 岬や島が多数存在するような複雑な地形条件下では、方向スペクトルの周波数分割数及び方向分割数の違いが推算精度に影響する。特に方向分割数が不十分な場合、うねりの波向の再現精度が不十分となり、うねりの影響を受ける地点では波高を過小評価する。
- ③ 内湾域に見られるような局所的な地形条件下では、ハイブリッドモデルによる推算海上風をマスコンモデルで修正した海上風を用いることが、波浪推算精度を向上させる有用な方法である。

謝辞：本研究では、波浪推算の実施に際し、ECMWF から提供されている客観解析データを使用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 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.
- 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，pp. 65-97.
- 橋本典明・川口浩二・池上正春・鈴山勝之(2004a)：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.
- 橋本典明・鈴山勝之・永井紀彦(2004b)：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.
- 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.