

GFS-WRF-SWAN 援用波浪推算システムの構築と検証

間瀬 肇^{*}・木村雄一郎^{**}・Tracey H. Tom^{***}・小川和幸^{****}

最新で適切なオープンソースの気象・波浪予測計算プログラムと最新気象データを有機的に連携させることにより、簡単に、安く、早く、正確な波浪予測ができるシステム、また、高潮・高波災害が生じた後の災害解析に利用できるGFS-WRF-SWAN援用波浪推算システムの構築およびその精度検証を行った。日本沿岸の7地点における数時間から数日後の波浪の予測値と観測値の比較、および台風0423号、0416号、0418号時の特定の地点における波高追算値と観測値の比較から、本システムの有用性を示した。

1. はじめに

海浜・海難事故は、海上保安庁や各種マリン団体による安全対策がなされているにもかかわらず、毎年増加している。海上保安白書によると、平成11年における海浜事故者数は800人、そのうち死亡者は348人、また平成14年における海難事故による死亡者数は、漁業中、レジャーボート等を合わせると213人と報告されている。これら事故原因の一つに、精細な気象・海象情報を知らなかったことが挙げられる。

気象予報モデルおよび波浪予測モデルは、近年目覚ましい発展を遂げている。それぞれの研究成果はオープンソース化され一般に開放されているが、その使いこなしは専門家に限られ、一般市民には困難である。既存の気象・海象予報モデルとしては、沿岸開発や港湾・海洋工事の安全管理のために利用されている、(財)沿岸開発技術研究センターが提供する「COMEINS」(国土交通省港湾局の波浪実況データと気象庁の数値解析データや波浪実況データとをオンラインで結んだ情報配信システム)があるが、これは日本国内の一部の海洋関係者が専用端末や専用ソフトを用いて使用する(2004年よりWebでの配信が始まった)サービスであり、一般マリンレジャー愛好者やマリン産業関係にとっては敷居が高い。

本研究は、最新で適切なオープンソースソフトと最新気象データを有機的に連携させることにより、簡単に、安く、早く、正確な波浪予測ができるシステム、また、高潮・高波災害が生じた後の災害解析に利用できる波浪推算システムの構築とその精度検証を行うものである。

2. GFS-WRF-SWAN 援用波浪推算システム

(1) システムの構成

日々の気象変化は複雑であるが、気象は風や気温、湿度などの物理量によって決定される。これらの物理量の時間変化は、いくつかの基本的な物理法則によって支配されており、それらの支配方程式を解くことで、気象解析が可能になる。複雑な支配方程式を解き、最新の気象情報を提供するに当たっては、超高性能なコンピュータが必要であり、価格も高い。

本研究では、スーパーコンピュータの計算結果をネットワークを利用してダウンロードし、風情報および波情報に加工するシステムを構築する。そのためのパソコンシステムとして、Class I Linux Beowulf クラスターコンピュータシステムを以下の理由により選択した。

- 1) 市販のハードウェアで組むことができ、Ethernet やその他のネットワークに接続可能である。
- 2) WRF (Weather Research and Forecast) や SWAN (Simulating WAVes Nearshore) を MPICH (メモリ分散型の並列計算を行うためのMPI規格を実現したライブラリー) を使って並列計算が行える。
- 3) 従来のスーパーコンピュータより、価格/パフォーマンス比が3倍から10倍良い。
- 4) GNU オープンソースライセンス下のオペレーティングシステムやソフトが利用可能である。

オペレーティングシステムは、MPICH を備えた Fedora Linux とした。

(2) GFS, WRF および SWAN

波浪予測にあたっては、風の情報が必要になる。気象庁の数値解析予報システムで作成されたデータである全球モデルGPVは毎日2回(2:30, 14:30頃)、領域モデルGPVは毎日2回(2:00, 14:00頃)、メソモデルGPVは毎日4回(4:50, 10:50, 16:50, 22:50頃)配信されるのでそれらを用いることも可能であるが、月々の費用が必要である。ここでは、以下に示すデータおよび解析モデルを援用する。

GFSは、アメリカの環境予報局(NCEP: National Centers for Environmental Prediction)によって構築された全球気象予報

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

** 正会員 工修 日立造船(株)

*** 気象予報士 (株)サーフレジェンド

**** システム管理マネージャー (株)サーフレジェンド

モデルである。このモデルは、全球において観測された気象値を解析し、緯度方向に768、経度方向に384に区切った格子状において気象予報計算を行い、予報値を3時間間隔、経度・緯度方向に1度間隔で、1日4回(00, 06, 12, 18UTC)384時間先までのデータがweb上にアップロードする。再解析値は6時間毎のデータを経度・緯度方向に1度間隔でアップロードされ、1年間無料でダウンロードすることができる。GFSモデルで扱われている現象は太陽放射を熱源としており、それによって起こる地球放射、対流、降水、内部重力波を精巧にモデルに取り入れている。

WRFは、アメリカ大気研究局(NCAR: National Center for Atmospheric Research)によって開発された局地気象予測モデルである。WRFは、GFSの1度間隔のデータを取り込んで、メソスケールの気象予測計算を行うことができる。このモデルは、予測方程式と呼ばれる6つの方程式と診断方程式、気体の状態方程式を解く。

SWANはデルフト工科大学で開発された沿岸波浪推算モデルである。第3世代波浪推算モデルに属し、世界中で使用されているWAMモデルを浅海域まで拡張したものである。

(3) 波浪予測計算のフロー

波浪予測の計算フローは、1度間隔のGFSデータをダウンロードし、日本近海を対象とした1度メッシュの波浪予測計算を行う(例えば、領域R00とする)。特定の地域(例えば、領域R02とする)を対象とする場合には、領域R00の計算結果である領域R02外縁の波浪計算結果を境界条件として、領域R02を対象とした波浪予測計算を行う。図-1に計算結果の例を示す。

現在を起点にした気象予報値のデータを用いる場合と過去の解析データを用いる場合は、それぞれGFSデータサーバが異なる。予測値を用いる場合は

http://www.nomad1.ncep.noaa.gov/cgi-bin/ftp2u_avn.sh

過去のデータを用いる場合は

<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>

である。

3. GFS-WRF-SWAN 援用波浪推算システムによる予測値と観測値の比較・検討

(1) ナウファス7地点における予測値と観測値の比較

ナウファス(NOWPHAS, 全国港湾海洋波浪情報網: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS)は、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、国土技術総合政策研究所およ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である。2003年12月現在において、全国54観測地点(波高・周期54地点、波

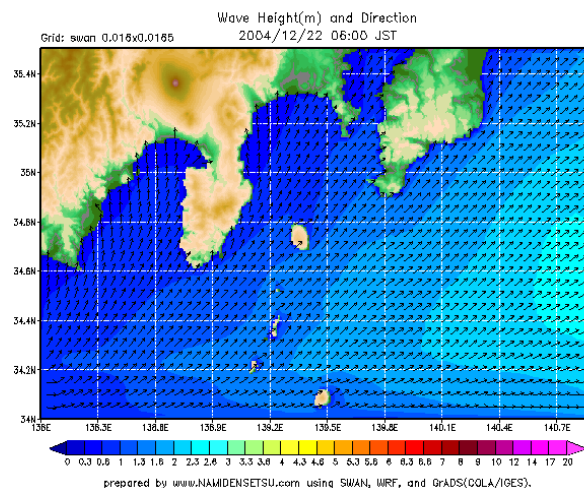
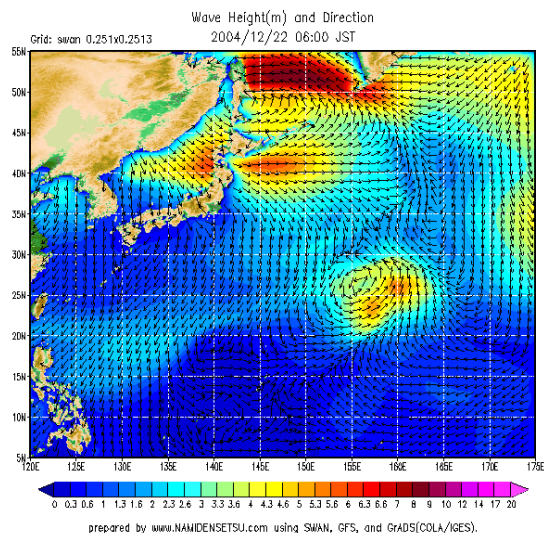


図-1 波浪予測計算の例(上段:領域R00;下段:領域R02)

向42地点)の沿岸の波浪情報が2時間毎に観測されており沿岸域の開発・利用・防災に、幅広く活用されている。本研究では、1度間隔のGFSデータをSWANの入力データとして波浪予測計算を行い、予測値と観測値を比較して本推算システムの有用性を検討する。ここでは、外洋に開いた観測点とみなされる輪島、金沢、鳥取、浜田、紋別、十勝、むつ小川原の7地点を対象とした。また、対象とした期間は2004年11月1日～同年12月31日の61日分である。

比較に用いる予測値は毎日9時に取得したGFSデータを用いてSWANによって計算した5時間後、11時間後、23時間後、47時間後、57時間後、69時間後の波高と周期の値であり、これらの計算値はナウファスの当日14時、20時、翌日8時と20時、翌々日8時と20時の観測値に対応する。

取得するGFSデータは1度間隔の風データであるが、SWANを用いて波を計算する際は、0.25度(15分)間隔の地

形データを用いている。風のデータは0.25度毎に内挿される。

図-2および図-3は、紋別と輪島における、計算開始時刻の23時間後および47時間後の波高の観測値と予測値の時系列を示したものである。紋別における観測値と予測値の相関係数は0.89および0.90であり、予測値は観測値に比べて平均的に2割小さくなっているが、時系列に関しては対応はかなり良い。輪島における観測値と予

報値の相関係数はそれぞれ0.94および0.89とかなり良いが、図-4に示すように、観測値そのものは2割程度観測値よりも小さくなっている。

その他の地点においても、観測値と予測値の時系列を比較したところ、図-5の相関係数に示すとおり、時系列の変化はかなり良くあうこと、予測値は観測値より2~3割小さいことがわかった。図-5から予報時間が長くなっても相関係数は急に小さくなる様子は見られない。これ

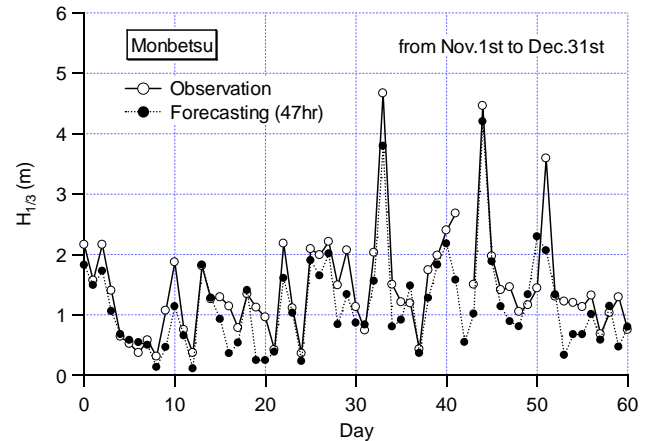
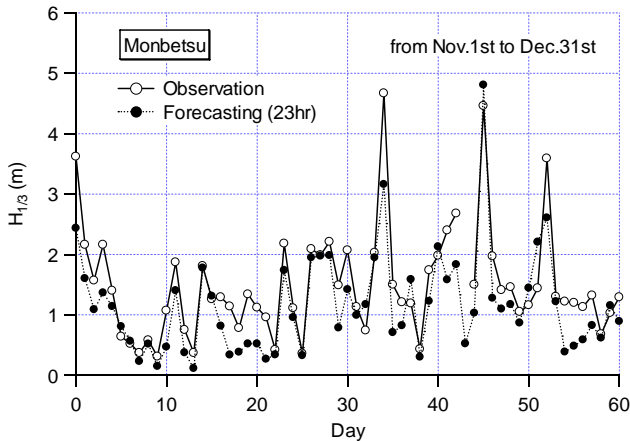


図-2 紋別における波高の観測値および予測値の時系列

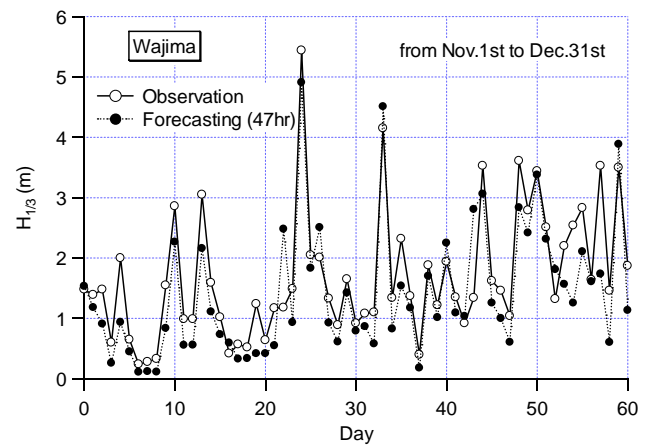
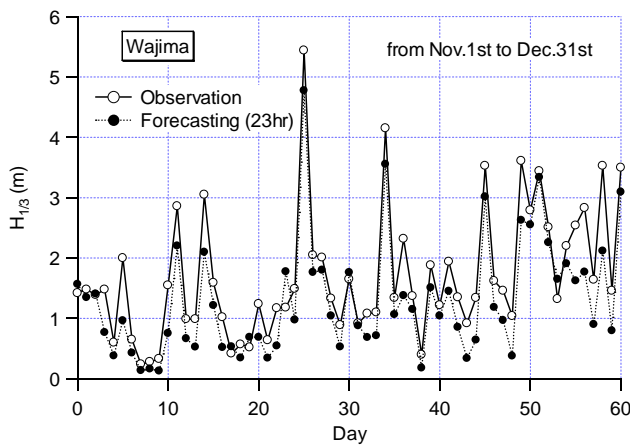


図-3 輪島における波高の観測値および予測値の時系列

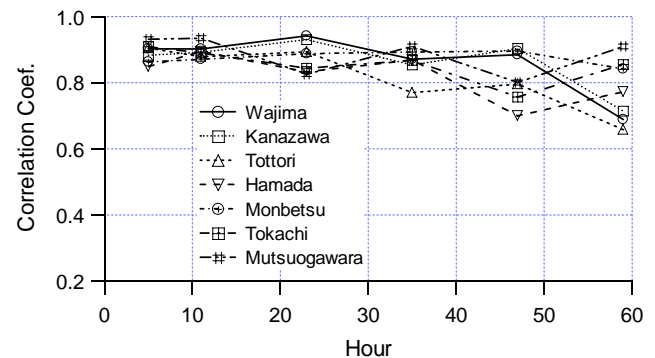
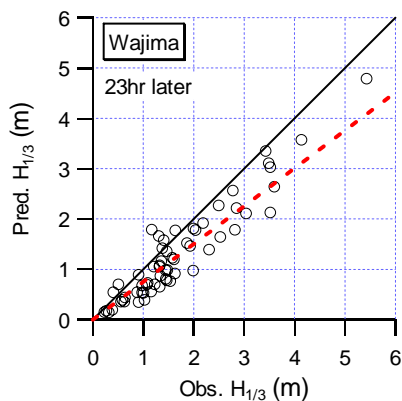


図-4 輪島における23時間後の波高の観測値と予測値の比較

図-5 7地点における波高の観測値と予測値の相関係数

は、今回の比較時期が冬季であり、西高東低の気圧配置が比較的安定していることによるものと考えられる。

波高予測値と観測値の相違の原因としては、以下のことが考えられる。

- 1) 波高計と計算地点が正確には一致しない。
- 2) 海底地形のデータが粗すぎる。
- 3) 波浪計算の分解能が粗すぎる。
- 4) 観測地点が周辺微地形の影響を受けている。
- 5) GFS の風データが小さ目になっている。
- 6) 計算の精度が悪い。

これらの点については、冬季以外に、春季および秋季に、より細かい地形データを用いた波浪予測計算を行うことによって検討する必要がある。

(2) 室戸沖における高波解析

台風 0423 号により防潮堤が決壊した室戸岬町の被災地から約 2km 西の沖では、被災時間帯に観測史上最高の波高 13.55m、周期 15.8s の高波が観測された。台風 0423 号は 10 月 19 日 15 時頃に沖縄本島に接近し、北東に進路をと

り 20 日 12 時頃に足摺岬に接近した。その後、進路をやや東よりに変え 20 日 15 時頃に高知県東部に上陸した。上陸後さらに東北東に進路をとり紀淡海峡に抜けて、和歌山県北部に再上陸し、茨城県南部から太平洋に再び抜ける 21 日 6 時頃まで本州を横断した。

計算に当たっては、台風接近以前の GFS の予報データを用いた予測計算と、台風通過後の再解析データを用いた追算計算を行った。GFS データは 1 度間隔、SWAN では 0.25 度間隔とした。

図 -6 は 2004 年 10 月 20 日 14 時の波高分布図を示したものであり、図 -7 は室津における波高の観測値 (●印)、追算値 (○印)、予測値 (◇印) を比較したものである。図 -7 によると、波高の最大値を示している時刻に差異が見られ、観測値と比べて追算値では 4 時間、予測値では 2 時間遅れている。また、波高のピーク値を比較すると、追算値、予測値は観測値に比べて 1 割程度小さくなっている。

予報値と追算値が観測値に比べて鈍った時系列を示す原因については、以下のことが考えられる。予測計算では 3 時間毎、追算計算では 6 時間毎の GFS 風データを用いる。台風 0423 号は計算対象地点付近を通過し、風の場合は場所的・時間的に急激に変化する。GFS データは空間格子間隔や時間間隔が台風現象に比べて粗く、急激な風場を再現できていないと考えられる。

今回の計算では、急発達・急減衰する波高時系列の再現は正確にできなかったが、ピーク値に関して言えば概ね再現可能であった。今後ダウンロードされるデータの格子間隔や時間間隔が短くなれば波の精度は向上するものと思われる。実際、GFS の計算は約 0.5 度で行われているが、ダウンロードデータは 1 度間隔になっている。

(3) 瀬戸内海における高波解析

瀬戸内海沿岸地域に大きな被害をもたらした台風 0416 号と 0418 号を対象として高波追算を行い、神戸港で得られた観測結果と比較する。瀬戸内での波浪計算においては、1 度間隔の GFS データだけでは風場の再現に不十分であるため、WRF を利用して風の間を計算した。WRF を用いて気象解析を行う際の領域は、西端 117° 30' 00" E、東端 127° 00' 00" E、南端 34° 00' 00" N、北端 41° 30' 00" N であり、東西方向約 550km、南北方向 220km である。また、藤田の台風モデルによって風の間を算定した波浪予測計算も行った。

台風 0416 号は 8 月 30 日の 9 時頃に鹿児島県西部に上陸し、進路を北北東に保ち同日 15 時過ぎに周防灘に貫けて山口県に再上陸した。その後島根県から日本海に出て北東に進路をとって 31 日 11 時頃には青森県に達し、翌日には温帯低気圧となった。台風 0418 号は 9 月 7 日の 9 時頃に長崎県に上陸し、進路を北東に保ったまま関門海峡を

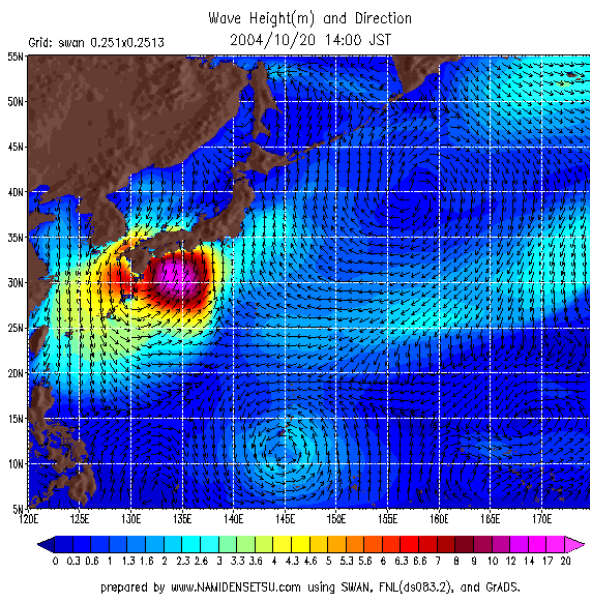


図 - 6 台風 0423 号による有義波高の平面分布

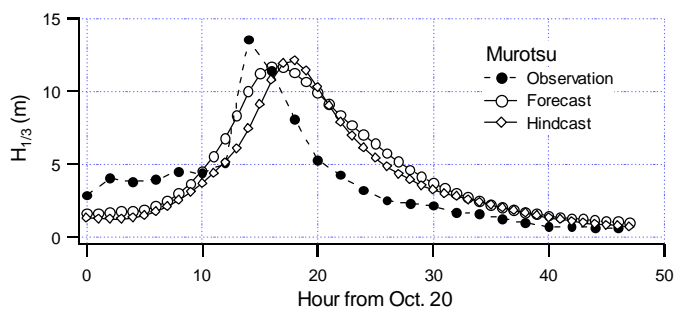


図 - 7 室津における波高観測値および予測値、追算値の比較

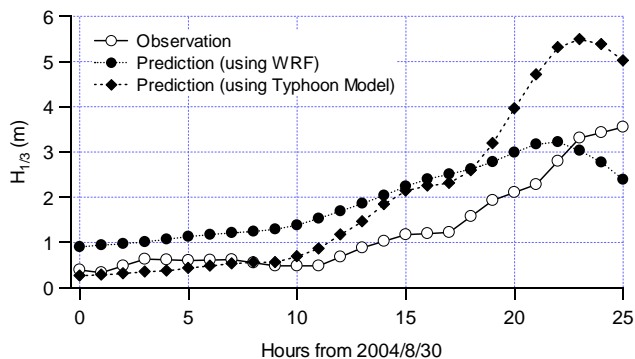


図-8 台風0416号時の神戸における波高観測値追算値の比較

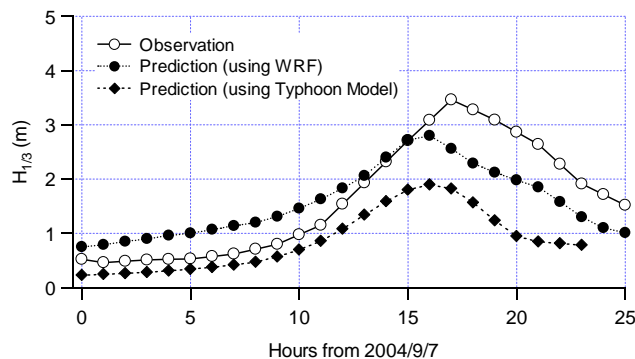


図-9 台風0418号時の神戸における波高観測値追算値の比較

通り同日12時過ぎに山口県に再上陸した。その後13時頃に日本海に出て翌日6時頃北海道に再上陸し、同日の午後には温帯低気圧となった。

台風0416号時の神戸港における有義波高の観測値と追算値の比較を図-8に示す。ここでは示していないが、風速の観測値とWRFによる追算値を比較すると、最大値を示している時刻は概ね一致するが、そのピーク値は観測値が26.6m/sであるのに対して追算値は21.9m/sであり、1割強追算値が小さくなっている。台風モデルによる風速の追算値は急な立ち上がりを見せており、その傾向は観測値が示す曲線と類似しているが、風速のピーク値は34.2m/sであり観測値に比べて3割程度大きくなっていた。そのような風の時系列に対応して波高についても同様の傾向が、図-8に見られる。

台風0418号時の観測値と追算値の比較を図-9に示す。風速の最大値を示している時刻は観測値、WRFおよび台風モデルによる追算値ともに一致していた。しかし、観測値のピークが24.4m/sであるのに対して、WRFを用いた追算値は20.4m/s、台風モデルを用いた追算値は31.8m/sであり、WRFを用いた計算結果は観測値に比べ約1割小さい値となっている。これに対応して図-9に見られるように、波高観測値のピーク3.5mに対してWRFによる追算値のピークは2.7mとなっている。台風モデルを用いた場合には、風速は大きいにもかかわらず波は小さくなっている。これは風向が実際の現象と一致していないためであると考えられる。

観測値はないが、広島および高松においてGFS-WRF-SWANを用いた波高予測値と台風モデル-SWANを用いた波高追算値を比較した結果、前者による追算値の方が合理的な結果が得られることがわかった。例えば、台風0418号時の高松においては、高潮は大きかったが、波は小さかったといわれている。GFS-WRF-SWANモデルによれ

ば、有義波高の推算値は1m以下になるのに対し、台風モデル-SWANを用いると4.5mと算定された(木村, 2005)。

5. おわりに

本研究は、最新で適切なオープンソースソフトと最新気象データを有機的に連携させた「波浪予測・追算システム」の構築およびその精度検証を行い、予測値と観測値にはある程度の差があるものの、使いやすく、応用、適用に関して有用であることがわかった。

今後、春季や秋季における予測値と観測値の比較、詳細な地形データを用いた予測値と観測値との比較等を通して、モデルの更なる検証と改良を図っていく予定である。

最後に、観測データの使用に関して(独)港湾空港技術研究所、海象情報研究室長 永井紀彦氏ならびに関係者の方々に謝意を表す。

参考文献

- 木村雄一郎(2005): GFSおよびWRF, SWANを援用した波浪予測・追算システムとその応用に関する研究, 京大大学院都市環境工学専攻修士論文, 37p.
- GFS (Global forecasting System): A medium range synoptic forecasting system developed and processed, NCEP (the National Centers for Environmental Prediction), <http://www.emc.ncep.noaa.gov/modelinfo>.
- SWAN (Simulating Waves Nearshore): A numerical wave model for obtaining realistic estimates of wave parameters in coastal areas, lakes and estuaries from given wind-, bottom-, and current conditions, Delft University of Technology, <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/default.htm>.
- WRF (Weather Research and Forecasting): A mesoscale numerical weather prediction model, NCAR (the National Center for Atmospheric Research), <http://wrf-model.org/>.