

SWAN を用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検証

間瀬 肇*・平尾博樹**・國富將嗣***・高山知司****

1. はじめに

台風 9918 号は、八代海, 周防灘, 広島湾で大きな高潮・高波災害を引き起こした。一般に, 被災時の高潮・高波を現地調査から推定することは容易ではない。しかし, 被災実態と外力要因との関連を調べる上で, 外力の推定が必要である。現在, 波浪推算モデルとして WAM が世界的に用いられている。WAM は, 大スケール (例えば地球規模) での波浪推算のみならず, 最近では日本沿岸での波浪推算にも用いられている。

本研究では, 波浪推算モデルとしてデルフト工科大学で開発された SWAN (Simulating WAVes Nearshore, Cycle 3 Ver. 40.11) を用い, 日本沿岸域での波浪推算を容易に行えるようシステム化する。次に, 100 km スケール (例えば, 広島湾や大阪湾) での波浪推算を SWAN と WAM を用いて行い, 両者の比較を通して SWAN の特徴を検討する。この波浪推算システムを用いて, 台風 9918 号による広島湾内波浪, および 5 つの台風による大阪湾内波浪の追算を行い, 観測結果と比較し適用性を検証する。

2. 波浪推算モデル SWAN

2.1 モデルの基礎

SWAN は, 周波数, 方向, 空間座標の 4 独立変数の関数である波作用量平衡式を解くことによって, 流れの影響も考慮した波浪変化を計算する (Holthuijsen et al., 2000)。波作用量平衡式は, (x, y) 座標系および球面座標系のそれぞれが組み込まれている。ソース項は, 発達, 減衰, 非線形干渉について, 数種のオプションが選択できる。本研究で選択したオプションの詳細は, 間瀬ら (2001) を参照されたい。

風から波へのエネルギー流入は, Phillips の共鳴理論と Miles の相互作用理論を加えたものである。本研究では Ris (1997) に従い, 線形増幅項を選択せず, 指数関数的増幅項については Komen モデルを採用した。

エネルギー散逸は, 白波, 底面摩擦, 浅海砕波の 3 つの要素からなる。SWAN における白波モデルは, 有限水深で適用できるように波数を用いて再定式化されている。式中のチューニング係数は, 使用される風入力モデルによって異なる。砕波モデルとしては, bore モデルが用いられている。

4 波共鳴は離散相互作用近似 (DIA) を用いて計算される。有限水深での 4 波共鳴は, 深海域での 4 波共鳴にスケール係数を乗じる。浅海域では 3 波共鳴が重要な役割を果たす。SWAN では, 3 波共鳴の計算モデルとして, Eldeberky (1996) による LTA (Lumped Triad Approximation) が用いられている。ただし, アーセル数 U_r が $10 > U_r > 0.1$ において 3 波共鳴が計算される。

波作用量スペクトルは, 方向と相対周波数を分割することによって離散化される。周波数分割は, 任意の下限と上限の間で定義される。下限周波数より低い周波数領域ではスペクトル密度は 0 とし, 上限周波数より高い周波数領域では, f^{-m} の形で扱われ, 定義された周波数領域内部と連続的に接続される。

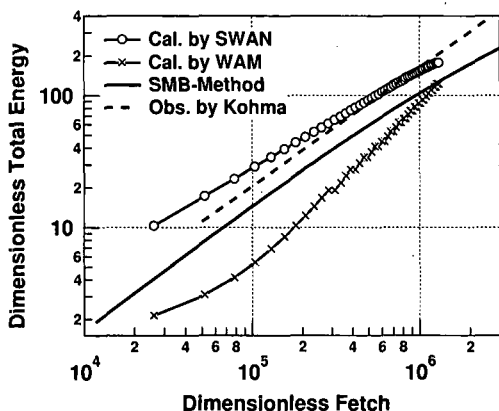
計算では時刻を 1 ステップ進める際に反復計算を行い, ある割合の計算格子点における計算結果が, 収束条件を満たすと反復計算のループを抜ける。

2.2 WAM との相違

WAM (WAMDI group, 1988) は支配方程式にエネルギー平衡式を用い, SWAN は波作用量平衡式を用いている。SWAN は WAM を拡張して開発されたモデルであることから, ソース項のモデルは, 細かな定数を除いて WAM と同様である。ただし, 浅海域に対応するため, 3 波共鳴と水深で規定される砕波が新たに加えられている。波の指数関数的発達について, SWAN (40.11) では, Janssen モデルに加え Komen モデルが選択可能である。

両モデルは支配方程式の差分法が大きく異なる。WAM は移流項に 1 次風上差分, ソース項には中心差分を用い, 移流項とソース項を単位時間ステップ内で交互に差分する。この点で, WAM は時間的に陽的な解法である。一方で, SWAN は空間においては 2 次オーダー風上差分, スペクトル領域においては 1 次オーダー風上差分と 2 次オーダー中央差分のハイブリッド型スキームを

* 正 会 員 工博 京都大学防災研究所 助教授
** 工修 東海旅客鉄道(株)
*** 正 会 員 工修 國富(株)
**** フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授



図一 無次元吹送距離に対する無次元エネルギーの変化

用い、伝播項とソース項を同時に離散化する。SWAN は同一タイムステップ内で繰り返し計算を行うことから、時間的に擬似陰的スキームである。

2.3 SWAN と WAM によるモデル計算結果の比較

深海条件における SWAN と WAM による推算結果を比較するため、一様水深 300 m の海域に一様な南風 20 m/s が吹きつづけるモデル計算を行った。後に大阪湾などの閉鎖湾における波浪推算を行うことを考慮して、領域の大きさは約 100 km の矩形とした。詳細な計算条件は、間瀬ら (2001) を参照されたい。

無次元吹送距離 X^* に対する無次元エネルギー E^* を図一に示す。図には、Komen モデルを用いた SWAN の計算値および WAM (Janssen モデル) の計算値がプロットされている。図中の破線は Kohma and Calkoen (1992) による観測結果を表す近似直線である。また、SMB 法による推算値を実線で示している。

SWAN による計算結果は $X^* > 2 \times 10^5$ で観測値とよく一致している。しかし、フェッチの短い領域では、無次元エネルギーの計算値は観測値に対して過大評価する。このケースと同様の計算条件で、格子間隔を大きくした計算結果は、いずれのケースも風上側の 5 格子ぐらいの領域では観測値よりやや大きな値を示した。

WAM による推算値を見ると、計算領域全域で観測値および SMB 法いずれに対してもかなり小さく、 $X^* = 10^6$ 付近で SMB 法による推算値に近づく。また、無次元ピーク周波数については、Kohma and Calkoen (1992) の近似曲線に比べ、 $10^5 < X^* < 6 \times 10^5$ で 25% 程度過大評価する。WAM のソースコード内では、成分波の周波数 f およびタイムステップ Δt の関数であるリミッターが用いられている。本ケースでは格子間隔は 0.02 度と細かくした。このため、 Δt は 10 秒としたが、それによってリミッター値が小さく押さえられ、波浪が発達しなかった。

WAM を使用する場合、適正なグリッドサイズの範囲

で計算することが必要であり、逆に、WAM モデルを狭い領域に適用するためには、リミッターを改良する必要がある。

3. SWAN を用いた日本沿岸波浪推算システム

3.1 システムの構造

SWAN においては、水深を与える領域、風速・風向を与える領域、および計算対象領域はいずれも独立しており、これらの領域を自由に設定することが可能である。また、SWAN は 1 つのコマンドファイルによって、モデルの実行を制御している。この点に注目すると、あらかじめ波浪推算を必要とする地点を設定して、その対象領域における水深データおよびコマンドファイルを準備しておけばよい。

a) 計算の実行

沿岸域における計算精度を向上させるためには、大中小 3 つの計算領域をネスティングし、計算を実行する。もちろん、状況によって大領域だけの計算で良い。

3 つの計算領域のうち最も広い第 1 領域は、北緯 20.0 度～50.0 度、東経 115.0 度～155.0 度の矩形からなる。計算対象海域に関わらず、この第 1 領域は固定する。第 2 領域および第 3 領域は、それぞれ、約 3 度および約 0.5 度のスケール矩形とするが、設定ファイル中で経度および緯度の範囲を変えることで、対象領域の変更を容易に行うことができる。

b) 必要なデータ

入力データとして必要なものは、①計算条件設定データ、②水深データ、③風データの 3 つである。これらのデータのうち、波浪推算ごとに異なるデータを用いるのは風データだけである。水深データは、広領域水深データおよび狭領域水深データの 2 つである。広領域水深データは第 1 領域および第 2 領域の計算に共通に用いる。第 3 領域用の狭領域水深データは、計算領域の格子間隔を考慮すると 0.01 度程度の解像度が必要である。

3.2 閉鎖性湾内発生波推算におけるネスティングの影響

ここで定義する閉鎖性湾とは、対象とした湾域が計算領域外からの入射波浪の影響が無視できる湾をいう。こうした湾では、外洋からの計算が不要となり、計算時間を大幅に短縮できる。

ここでは大阪湾を対象として、図二のように、領域 2 と領域 3 を設定した。この計算領域に図三に示すような南風を 24 時間吹かせ、3 つの領域をネスティングした計算結果と、第 3 領域のみ単独で計算した結果を比較した。テストポイントは大阪港にあたる北緯 34°36'46"、東経 135°23'16"とした。

図四は、ネスティングした場合としない場合の、

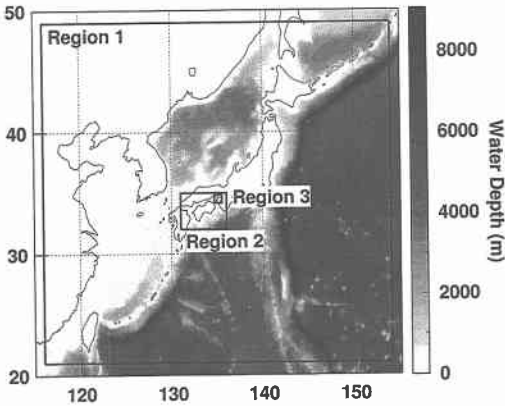


図-2 計算領域

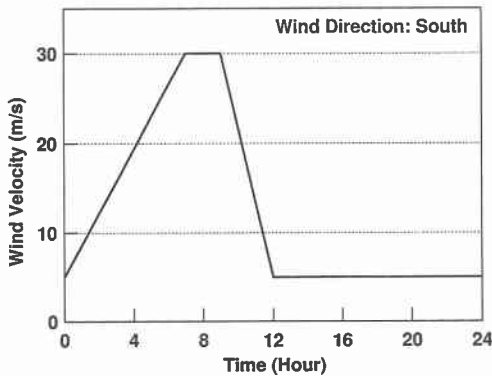


図-3 風の入力条件

テストポイントにおける有義波高と平均周期の時間変化を示したものである。有義波高の推算結果を見ると、風速が時間と共に増加し、9時間後に最大値を示している。このとき、ネスティングを行ったほうが、行わない場合に比べてわずかに大きい有義波高を示している。平均周期も同様に、風速が減少し始めるときにピーク値をとり、ネスティングを施したほうがしない場合に比べやや大きい値を示す結果となった。こうした検討から、台風接近時など湾内で風波が卓越する状況においては、ネスティングの影響は少ないことがわかった。

4. 閉鎖性湾内における波浪推算精度の検証

4.1 広島湾における台風 9918 号時の波浪推算

広島湾におけるデータは、広島浸水域被害調査報告書(広島県広島港湾振興局, 中電技術コンサルタント株式会社)による T9918 の経路データ, 観音沖の波浪データと風データである。詳細な計算条件は、間瀬ら (2001) に詳しい。

観音沖の風速風向計設置位置, 設置高さから考えると、この観測点は、地形の影響を受けない信頼性の高い観測

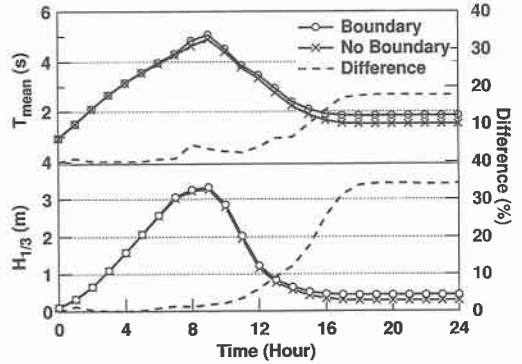


図-4 有義波高と平均周期の推算結果

ポイントであると考えられる。そのため、広島湾での波浪推算における台風風速場の作成にあたっては、観音沖観測所の風速を基にした一様風を用いた

図-5 および図-6 は、それぞれ広島観音沖における有義波高と周期の観測値, および SWAN と WAM による推算値を比較したものである。SWAN による推算値は観測値に対して若干過小評価しているものの、両者の一致は良い。なお、相関係数は 0.987 であった。

有義波周期は 8 時から 14:30 までの間、SWAN による推算値と観測値は比較的良好な対応を示している。14:30 以降の計算値の有義波周期は実測値を過小評価する結果となった。観音沖の観測された風速・風向によると、10 時以降、観音沖で南西方向の風が継続的に吹きつけていた。伊予灘は大島を介して計算対象とした広島湾に隣接し、佐田岬半島から大島までの北東方向に約 60~80 km のフェッチを持つ海域である。これらのことを考えると、伊予灘で発達した長周期成分の波浪が大島と倉橋島の間から広島湾内に伝播したと推測できる。

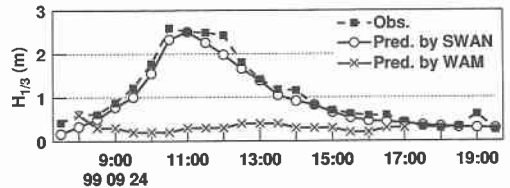


図-5 観音沖における有義波高の変化

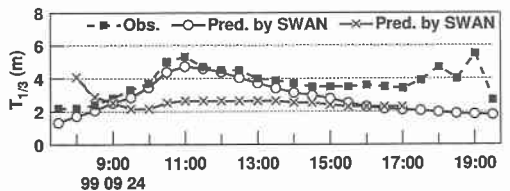


図-6 観音沖における有義波周期の変化

一方で、WAM による推算有義波高は、全推算期間にわたって、観測値に対し過小評価する結果となった。観測値の有義波高のピークに対応する 9 月 24 日 10:30 前後においても、推算有義波高は 0.2 m と観測値の 2.59 m に対して、かなり小さい値を示した。この原因は、WAM のリミッターのためである。

4.2 大阪湾における波浪推算

a) 計算条件

大阪湾における波浪データは関西国際空港、神戸港、大阪港の 3 地点で長期間にわたって観測されている。計算に用いた海上風速場は、Myers の式を用いて台風域内の傾度風速分布を求め、これに台風の移動速度を加えたものである。台風の移動速度は MT 局の海上風速に一致するように逆算して決めた (間瀬ら, 2001)。

波浪推算を実行するケースとして、入手できたデータ期間の中で、①有義波高が 1.8 m を超える、②大阪湾に台風が接近している、③関空で風速が観測されている、という条件を満たす 5 ケースを選んだ。

b) 観測結果と推算結果の比較

i) T8917

神戸港における有義波高の観測値と計算値を比較した結果、追算前半においては、計算値は観測値に対して大きい値を示していたが、後半は両者がよく一致した。関空における結果も同様に、追算期間前半で計算値は観測値より大きくなったが、後半では良く一致した。

ii) T9019

T9019 来襲における波浪再現性については、神戸港と関空においてやや差の生じる結果となった。神戸港における有義波高は全体に傾向を捉えるにとどまったのに対し、関空における有義波高は全推算期間にわたって定性的にかつ定量的に一致した。

iii) T9119

図-7 に T9119 接近時の関空における有義波高の観測値と計算値の比較を示す。観測された有義波高は 9 月 27 日 17 時に 0.95 m を示したあと、わずかに減少し、19 時以降増加する。ピーク前に相当する 22 時と 23 時のデータが欠測しているため、正確なピーク値は不明である。計算値は 17:30 に小ピーク 1.10 m となった後、23:30 に最大値 3.07 m となる。両者を比較すると、全体に良好な一致しており、特に、17 時付近の小ピーク、ピーク後の減少もよく再現できている。

iv) T9210

関空における有義波高について推算値と観測値を比較したものが図-8 である。観測された有義波高は 8 月 8 日 12 時に小さなピーク 0.47 m をとり、一旦減少した後、21 時に最大値 2.13 m を記録した。なお、8 日 22 時と 9 日 4 時は欠測であった。推算された有義波高は 8 日

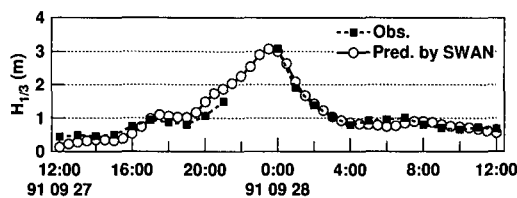


図-7 関空における有義波高の変化 (T9119)

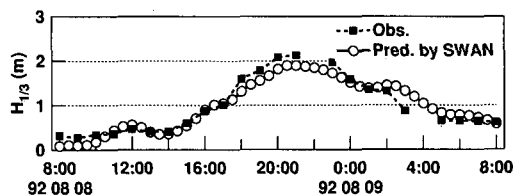


図-8 関空における有義波高の変化 (T9210)

12 時に小ピーク 0.559 m を示し、21 時に最大値 1.89 m に達する。両者を比較すると、12 時の小さなピーク、21 時の最大値、9 日 2 時前後の減少率の低下といった変化が良く一致しているのがわかる。

v) T9313

神戸港における有義波高についての観測値と推算値を図-9 に示す。やや推算値が観測値に対して小さ目の値となっているものの、良い再現性を示した。

図-10 は大阪湾における有義波高の計算値と観測値を比較したものである。ピーク前までの 2 段階の増加、また、ピーク後の段階的な減少傾向がよくあっている。

関空における有義波高の観測値と計算値を比較したのが図-11 である。この図によると、観測値および推算値はともに 5 時に最大値に達する。それぞれのピーク値は、観測値が 2.33 m、推算値が 2.57 m である。その後、8 時

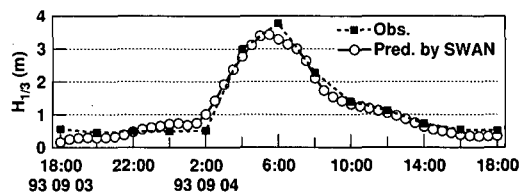


図-9 神戸港における有義波高の変化 (T9313)

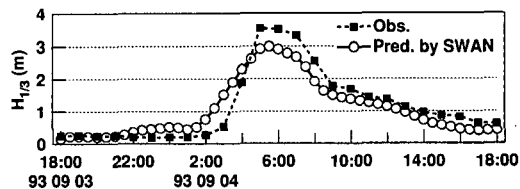


図-10 大阪湾における有義波高の変化 (T9313)

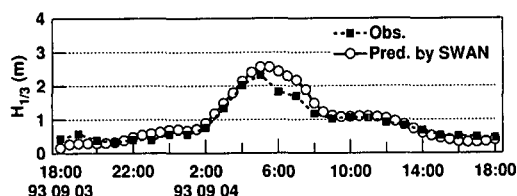


図-11 関空における有義波高の変化 (T9313)

前後まで、計算値が観測値に比してやや大きな値を取りながら下降するが、8時以降は、両者は良く一致する。

vi) まとめ

図-12は、台風5ケース、全テストポイント、全時刻における有義波高について、観測値と推算値をプロットした相関図である。相関係数は0.90であり、再現性が良いことがわかる。

観測値と推算値の相関を台風ケース毎および地点毎に調べた。台風のケースに関しては、T8917以外のケースは再現性が良かった。T8917は大阪湾直上を通過したため、台風に伴う湾内風速場は非常に複雑になっていたと考えられ、入力条件としての風速場の再現性が低かったため、再現性の精度が若干良くなかったものと考えられる。地点に関して、関空での再現性は非常に良かったが、神戸港における再現性はやや劣る結果となった。この原因は、風速場を関空の観測データに基づいて作成したため、関空から離れた神戸港付近では風場の精度が劣るためであると考えられる。

5. おわりに

本研究では、波浪推算モデルSWANを用い、日本沿岸域での波浪推算を容易に行えるようシステム化したのち、100 km程度の小スケールでの波浪推算をSWANとWAMを用いて行い、両者の比較を通してSWANの特徴を検討した。また、この波浪推算システムを用いて、台風9918号による広島湾内波浪、および5つの台風による大阪湾内波浪の追算を行い、観測結果と比較した結果、(1)広島湾内波浪に関して、推算有義波高と観測結果は良く一致すること、(2)大阪湾内波浪に関しては、台風

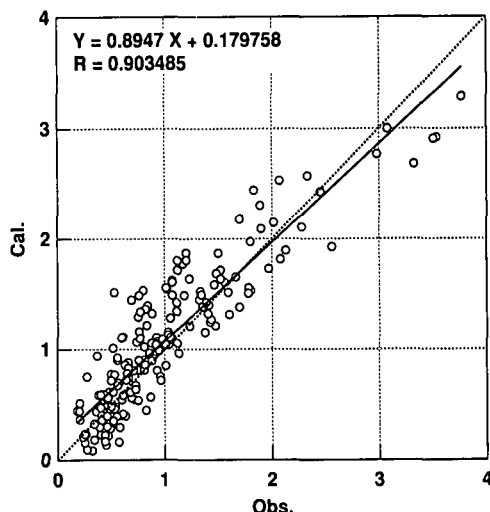


図-12 観測値と推算値の相関図

が大阪湾の真上を通過したT8917を除くケースにおいて波浪再現性が良いことが確かめられた。

本研究は、運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」による「高潮・高波の推算技術の高度化と防災に関する基礎研究」(代表:高山知司)による研究の一部であることを付記し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 間瀬 登・平尾博樹・國富將嗣・高山知司 (2001): SWANによる波浪推算システム—閉鎖性湾内における波浪推算への適用—, 京大防災研年報, 印刷中.
- Eldeberky, Y. (1996): Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone, Ph. D. thesis, Delft University of Technology, Dept. of Civil Eng., The Netherlands.
- Holthuijsen, L.H. *et al.* (2000): SWAN CycleIII ver. 40.11, User Manual, 124 p.
- Kahma, K.K. and C. J. Calkoen (1992): Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves, J. Phys. Oceanogr., Vol. 22, pp. 1389-1405.
- Ris, R. C. (1997): Spectral modelling of wind waves in coastal areas, ISSN 0169-6548, Report No. 97-4.
- WAMDI group (1988): The WAM model—a third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., Vol. 18, pp. 1775-1810.