

局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの 内湾波浪推算への適用

橋 本 典 明*・杉 本 彰**・川 口 浩 二***・宇都宮好博****

波浪推算の入力として用いる海上風の精度は、波浪推算の精度を直接左右する重要な要素である。外洋はもとより、内湾では特に詳細な風データが要求される。これは内湾海上風が陸地の影響を受ける複雑で局地性の高い現象であるためである。このような複雑な内湾海上風を推算するため、陸地や種々の気象要素の影響を適切に考慮した局地気象モデルにより、1999 年～2000 年の 2 年間を対象として東京湾の海上風を計算した。さらにこの風データを第三世代波浪推算法 WAM 及び SWAN に適用し、局地気象モデルと第三世代波浪推算法の内湾域への適用性を検討した。

1. はじめに

近年 WAM を始めとする第三世代波浪推算法により外洋では高精度な波浪推算が可能になってきた。比べて沿岸域、特に内湾域では推算精度の検証例が少なく、信頼性が高く実用的な内湾波浪推算法の早期開発が求められている。沿岸や内湾では波浪推算精度を左右する海上風が陸地の影響を受けて複雑で、空間スケールも数 km 以下等のより細かいものが要求される。また波浪推算で考慮すべき物理過程も複雑であることから、これまでに提案されている幾つかの海上風及び波浪推算法の内湾域への適用には問題があり、精度上にも疑問がある。

本研究では、①局地気象モデルを用いて高精度で高分解能の内湾海上風を計算し、②この海上風を入力とした内湾波浪推算を実施した。波浪推算モデルは第三世代波浪推算法の WAM と SWAN 及び我が国の内湾波浪推算に実績のある Tohoku-II を使用した。本研究は、これらのモデルによる海上風と波浪の推算精度及び適用性を検討することにより、高精度で信頼性の高い次世代波浪推算法の開発に資することを目的としている。

2. 局地気象モデルの概要

本研究では、精度のよい内湾海上風を推算するため、中西 (1999) による局地気象モデルを使用した。局地気象モデルは細かな地形変化を考慮した数 km スケールの気象予測が可能であり、陸域での予測には高い実績を持っている。しかし、これを我が国の沿岸海上風推算に利用し、精度検証した例は少ない。局地気象モデルはその基礎式に 3 次元の運動方程式、熱力学方程式、連続式等を用い、陸上地形、海面温度、気温、気圧、湿度等種々のパラメータを考慮して、乱流輸送、放射、凝結などの様々な物理過程に依存する風場の推算が可能である。表-1 に本研究で用いた局地気象モデルの概要を示す。

風推算領域は図-1 に示した東京湾を中心とする約

・	正会員	工博	(独法) 港湾空港技術研究所海洋水理研究室
・	工修	(株) 東京久米設計部	
・	正会員	工修	(独法) 港湾空港技術研究所海洋水理研究室
・	正会員	工修	(財) 日本気象協会首都圏支社調査部

表-1 局地気象モデルの概要	
項目	内容
基礎方程式	・運動方程式 ・熱力学方程式 ・水蒸気保存式 ・乱流エネルギー方程式 ・静水圧平衡式 (非静水も可能) ・連続の式
物理過程	・大気・地表面のエネルギー交換 ・地表面温度予測 ・大気境界層での乱流輸送 ・放射過程 ・凝結過程 ・降水過程
数値計算法	・中央差分 (空間差分において) ・ADI 法 (時間差分において) ・上部境界は放射境界条件 ・側面境界は放射条件 (水平風)、移流条件 (他要素) ・ネスティング可 (本研究では未使用)
入力条件	・気象庁 GPV 等客観解析データ ・標高データ ・土地利用データ (地面粗度, 土壌水分, 反射率) ・海面温度データ ・積雪深データ
計算領域	・水平 100~1000 km 程度 (格子間隔 1~10 km 程度) ・鉛直 5000~10000 m 程度 (格子間隔 20~400 m 程度)

160 km×190 km で、水平メッシュ間隔は 2 km とした。また、鉛直方向には地形に沿った Z* 座標系を採用し、下層から上層まで 20~400 m 間隔に 21 層を高度 5,200 m まで定義した。計算期間は 1999~2000 年の 2 年間で時間ステップは 20 秒で計算した。地表面の入力は標高データ、土地利用データ及び水温データを、上層の入力には気象庁 RSM モデルの GPV データを与えた。表-2 に計算条件を示す。

3. 第三世代波浪推算モデルの概要

(1) WAM モデル

WAM (WAMDI group, 1998) は、Wave action 方程式を用い、離散相互作用近似 (DIA) により 4 波共鳴の非線形相互作用を計算できる第三世代波浪推算モデルである。表-3 に WAM の概要を示す。WAM は外洋波浪推算においては多くの実績を持つが、浅海域においては使用例があまり報告されていない。これは WAM に含まれる幾つかのパラメータが外洋の波浪推算に適合するようにチューニングされており、必ずしも沿岸域の波浪推算に適していないためである。そのようなパラメータの一つにリミターがある。リミターは単位時間当たりのエネ

表-2 内湾海上風の計算条件

項目	内容
座 標 系	鉛直 Z*座標系 (地形に沿って鉛直座標をスケーリング)
計 算 領 域	162 km×192 km×5,200 m
計 算 格 子 数	82×97×21=167,034 点
水 平 格 子 間 隔	2 km
最小格子間隔 (鉛直)	20 m
時 間 ス テ ッ プ	20.0 sec
計 算 時 間	24 時間の計算に要する CPU 時間は約 3 時間
側 面 境 界 入 力	気象庁 GPV より, RMS 地上・上層データのネスティング
標 高 データ入 力	国土数値情報の 50 m メッシュ標高データ
植 生 入 力	100 m メッシュ土地利用データ
海 面 温 度 入 力	NEAR-GOOS データベース海面水温解析値

ルギーの増分に上限を設けるもので, WAM をデフォルトのまま高分解能の時間・空間格子に適用すると, リミターの働きにより波が発達しない。そこで本研究では, Hersbach・Janssen (1999) により提案されたリミターの改良を行い内湾波浪推算を実施した。なお, WAM は後述する SWAN に比べて計算負荷が小さく, 比較的短い計算時間で長期間の波浪推算が実施できる利点がある。

(2) SWAN モデル

SWAN (L. H. Holthuijsen, 1999) は, WAM と同様 Wave action 方程式を基礎として浅海部の種々の物理現象を式中に考慮した第三世代波浪推算モデルである。表-4 に SWAN の概要を示す。SWAN では WAM で考慮されていない幾つかの物理過程が考慮されている。特に 3 波共鳴の非線形相互作用が考慮されている点が特徴的である。ただし, 3 波共鳴は水深が十分に浅く, アーセル数が $10 > U_r > 0.1$ の時にのみ有効である。

SWAN による波浪推算は繰り返し計算を伴う収束計算であるため計算負荷が大きく, WAM に比べ長期間を対象とする波浪推算には不向きである。本研究では, WAM の推算結果をもとに高波浪の期間を抽出, その期間に対してのみ SWAN による推算を行うこととした。

また, 本研究では我が国の内湾波浪推算に高い実績を持つ第二世代波浪推算モデル Tohoku-II を用いて推算を行い, 上記 2 つの第三世代波浪推算モデルと比較した。Tohoku-II は風波の推算は単一パラメータを用いた発達方程式により計算し, うねりはスペクトル成分の伝播, 減衰を計算するモデルである。本研究において使用した 3 つのモデルの計算条件を表-5 に示す。

なお, WAM 及び SWAN は, 広領域の WAM の推算結果を境界条件とし, 狭領域を細かいメッシュで計算するネスティング手法を用いた。広領域は日本列島を中心とする北緯 15.0°~63.0 度, 東経 115.0°~170.0 度の範囲を対象とした。さらに中領域を挟み, 狭領域の東京湾内湾の推算範囲は北緯 34.5°~36.0 度, 東経 139.0°~140.5 度とした。風の入力には広領域に ECMWF の海上 10 m 風

表-3 WAM の概要

項目	内容
基礎方程式	・エネルギー平衡方程式
物 理 過 程	・波の伝播 ・海底地形及び流れによる波の屈折 ・浅水変形 ・風によるエネルギー入力 ・白波砕波理論によるエネルギー消散 ・海底摩擦によるエネルギー消散 ・ 4 波共鳴非線形相互作用によるエネルギー輸送
数値計算手法	・ 1 次風上差分法 ・移流項, ソース項を分離した解法 ・ 2 次陰の差分法 (ソース項) ・ DIA (非線形相互作用における離散相互作用近似) ・側面境界は開境界条件, ・ 1 方向ネスティング
入 力 条 件	・海上 10 m 風または摩擦速度 ・水深データ ・流れの流速データ
計算領域	・ 50 km 程度~全球 (格子間隔 1 分~)

表-4 SWAN の概要

項目	内容
基礎方程式	・波作用量平衡方程式
物 理 過 程	・波の伝播 ・海底地形及び流れによる波の屈折 ・浅水変形 ・風によるエネルギー入力 ・白波砕波理論によるエネルギー消散 ・海底摩擦によるエネルギー消散 ・地形性砕波 ・ 4 波共鳴非線形相互作用によるエネルギー輸送 ・ 3 波共鳴非線形相互作用によるエネルギー輸送 ・波による水位変化 ・防波堤等港湾構造物がある場合の波の反射
数値計算手法	・ 2 次風上差分法 (移流項空間差分) ・ 1 次風上差分, 2 次中心差分のハイブリッド法 (スペクトル空間差分) ・方程式全体を繰り返し計算で解く近似的陰解法 ・ DIA (4 波共鳴の非線形相互作用) ・ LTA (3 波共鳴の非線形相互作用) ・側面境界は開境界条件, ・ 1 方向ネスティング (SWAM, WAM, WAVE-WATCH III より)
入 力 条 件	・海上 10 m 風 ・水深データ ・流れの流速データ ・水位の平面分布データ ・海底の摩擦係数平面分布データ
計算領域	・ 1 km~5,000 km 程度 (格子間隔 10 m~100 km 程度)

を, 内湾に局地気象モデル推算風を用いた。狭領域の格子間隔は局地気象モデルの 2 km に合わせ 1 分とした。推算期間は 1999~2000 年の 2 年間である。

また, Tohoku-II の結果を他のモデルと同等に評価するには, Tohoku-II にもネスティング手法を用いるべきである。しかし, Tohoku-II については便宜的に狭領域のみを推算し, 精度を比較した。よって, Tohoku-II には外洋からのうねり及び風波成分は含まれていない。

4. 局地気象モデルの海上風推算精度の検討

図-2 は, 図-1 に示す東京湾内の海上風観測地点を対象とした 1999 年 11 月の気象擾乱時の観測風と推算風の時系列図である。ただし, 各観測地点における風速計高度は異なっているため図中にその高度を示す。

図-2 は急激に発達した低気圧と前線により短期間に

表-5 本研究における各波浪推算モデルの計算条件

内 容	WAM	SWAN	TOHOKU-II
座 標 系	球面座標系	球面座標系	平面座標系
計 算 領 域	1.5°×1.5° (約 167 km×167 km)	1.5°×1.5° (約 167 km×167 km)	48 km×82 km
空 間 格 子 数	91×91=8,281 点	91×91=8,281 点	49×83=4,067 点
時 間 ス テ ッ プ	1 分	3 分	2 分
計 算 時 間	24 時間分の所用時間は約 19 分	24 時間分の所用時間は約 1.5 時間	24 時間分の所用時間は約 2.9 分
境 界 入 力	WAM による外洋波浪推算ネスティング	WAM による外洋波浪推算ネスティング	
水 深 デ ー タ	計算中の発散を防ぐため平滑化	通常の水深データ	通常の水深データ
海上風データ入力	局地気象モデルによる内湾海上風		
そ の 他	浅海波浪推算用にプログラムを改良	発達項目に Komen モデルを使用	浅海波浪推算用にプログラムを改良

起きた擾乱時の時系列である。強風時、特に風速が急激に増大するピーク時付近において推算風はやや弱めに推算されるものの、各観測点において精度よく海上風が推算できることがわかる。

図-3 と図-4 は 2 年間の風推算データを観測地点別に示したもので、図-3 は風速の、図-4 は風向の相関図である。風速の相関係数は約 0.6 程度で、RMS 誤差は 3.10 m/s 程度である。一方、風向の相関係数は平均 0.89 で、RMS 誤差は 59.8 度である。風向、風速とも回帰式の勾配はほぼ 1 に近い値を示しているが、風速の回帰式

の勾配は両地点ともやや小さめに推定されている。これは風速計が 20 m 以上の位置にあるためであり、経験的に用いられる風速分布の 1/7 乗則で補正すると、勾配は 1 に近くなる。なお、時系列に見られる推算精度に比べ風速の相関係数が低く推定されているのは、時系列図に見られる位相のズレによる影響であると考えられる。

図-4 より、風向の相関は相関係数が高いにも関わらず、散らばりが大きく見える。これは風速が小さい場合に風向の誤差が大きいためである。そこで、図-5 に風速 5 m/s 以上に対する風向の相関図を示す。図-5 より、大きい風速では、風向の相関は高いことがわかる。

以上、2 年間分の風推算結果を総合的に判断すると、本研究で用いた局地気象モデルは、極端な強風を再現する際に計算が不安定になる特徴もあり、強風を推算するにはやや不向きである。しかし、長期間を通した種々の擾乱を対象とした観測風の再現性の観点からは、平均的に風推算精度が高く、内湾の細かな気象現象を再現できるモデルとして利用可能であることがわかった。

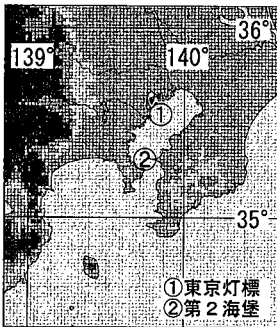


図-1 風推算領域及び観測地点分布

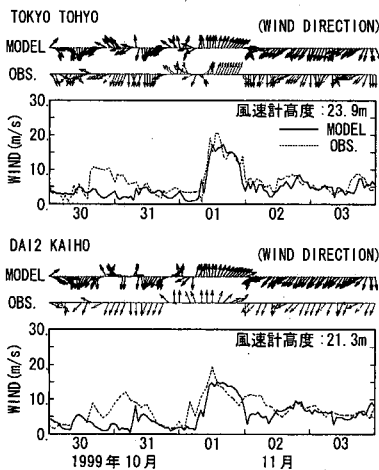


図-2 内湾海上風の時系列図

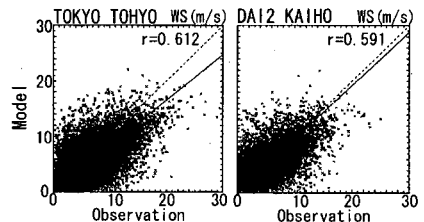


図-3 観測値と推算値の相関図 (風速)

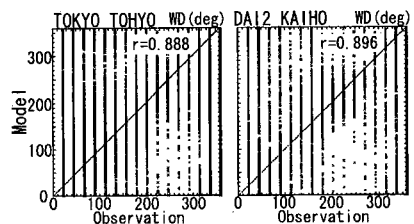


図-4 観測値と推算値の相関図 (風向)

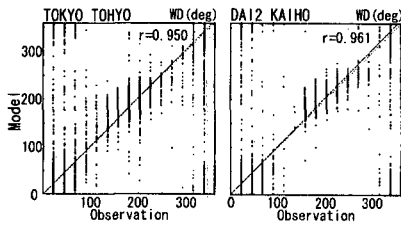


図-5 風速 5 m/s 以上の相関図 (風向)

5. 内湾波浪推算の精度に関する検討

図-6 に図-2 と同じ 1999 年 11 月を対象とした各波浪推算モデルによる推算結果と観測値の有義波高と周期及び平均波向の時系列を示す。波浪観測点についても海上風同様、東京灯標及び第二海堡の 2 地点を採用した。

波高を見ると、常時波浪である 1 m 未満の波高時では SWAN 以外のモデルではほとんど波高が発達しない結果となった。一方、1 m 以上の高波浪時には各モデルとも観測値をよく再現し、推算風との時間的変動の対応もよい。しかし、強風から弱風に変動する際に、SWAN 以外のモデルでは波高は急激に減衰する傾向が見られる。なお、湾口に近い第二海堡では、Tohoku-II の推算値は観測波高をかなり下回っている。これは、Tohoku-II では外洋からのうねりの影響を考慮していないためである。

周期を見ると、SWAN では概ね観測値に近い値が計算されているが、WAM では全体的に過大に推算され、Tohoku-II では過小評価されている。これは、WAM が外洋のうねりの影響を過大に評価し、一方 Tohoku-II では、その影響が考慮されないためと考えられる。

波向については観測値がほとんどないため、各モデルの再現性が検討できなかった。しかし、風向に強く依存する高波浪時の波向は各モデルにおいて妥当に再現されている。波向の変動傾向を見ると、WAM の波向は時間的にあまり変動せずほぼ一方向を示すのに対し、Tohoku-II では敏感に波向が変化する傾向が見られる。また、SWAN は Tohoku-II 程ではないにしても、波向が変化の様子が表されており、WAM と比較しても風に対する応答がよいことがわかる。

以上検討の結果、Tohoku-II では外洋のうねりを考慮していない不備はあるものの、強風時の波の発生・発達とほぼ妥当に推算し得ると言えよう。一方 WAM は波高、周期及び波向の推算結果から、外洋からのうねりを過大に評価していることがわかる。これは、内湾域の弱風に対する反応がやや鈍いためと考えられ、WAM の内湾波浪推算では、弱風に対する何らかの改良が必要と思われる。また、SWAN の推算値は各地点、各時刻においても観測値を比較的良好に再現しており、内湾波浪推算に

対して高い推算精度を有することがわかる。

図-7~9 に WAM、SWAN の推算値と観測値の相関図を示す。図-7 は WAM による 2 年間に渡る相関図、図-8 は高波浪時を含む短い期間に対する相関図である。図-9 は、図-8 と同期期間の SWAN の相関図である。

図-7 と図-8 より、WAM の推算結果は 2 年間通年の波高の相関係数がやや低めの値を示すものの、高波浪を含む短期間には高い値を示す。一方、WAM の推算周期を見ると、観測値と無相関であるような低い相関係数をとる。この結果と前述した波向の一方方向性より、WAM は外洋からのうねりを過大評価するため、内湾での風波、特に弱風に対する波の発生・発達の計算には、改良すべき課題があると言える。図-9 に示す高波浪時の SWAN の相関図を見ると、波高に対する SWAN の推算結果も WAM と同様に高い相関を示す。しかし、推算波高の観測値に対する分散の状態及び回帰式の勾配などを総合し

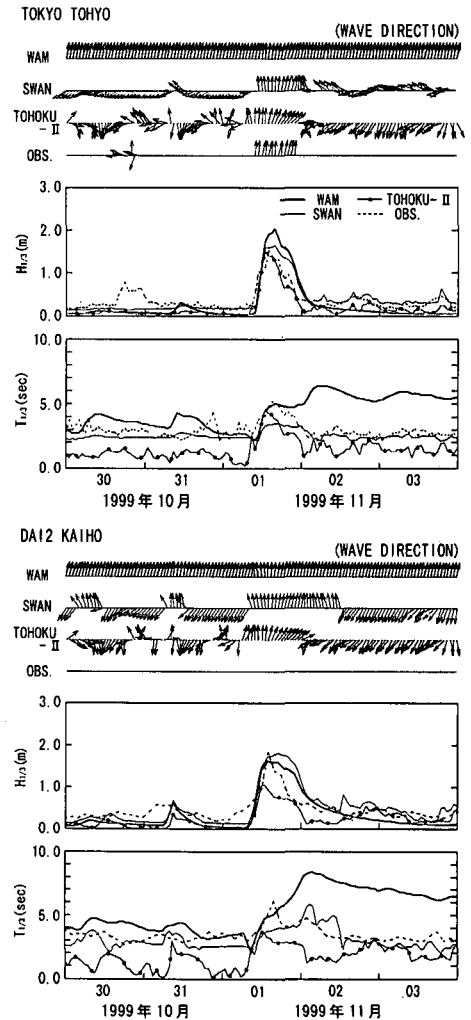


図-6 波浪諸元の時系列図

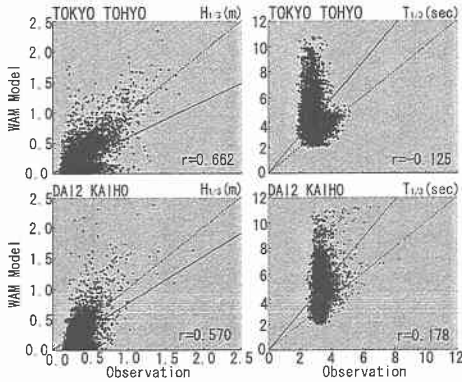


図-7 観測値と推算値の相関図 (WAM 通年)

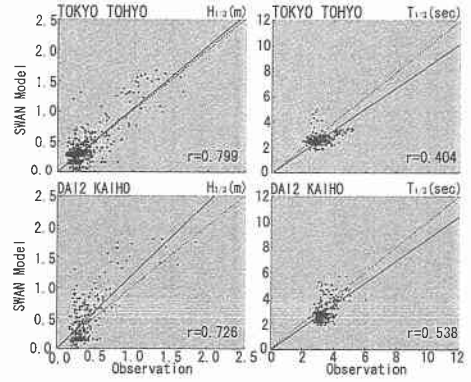


図-9 観測値と推算値の相関図 (SWAN 高波浪時)

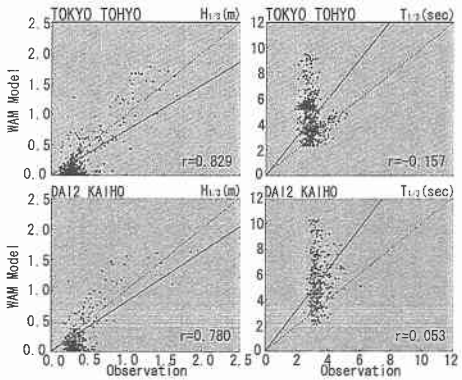


図-8 観測値と推算値の相関図 (WAM 高波浪時)

て判断すると、SWANの方がWAMに比べて観測値に近い値を推算できることがわかる。

一方、SWANの周期に関する相関図では、相関係数が相関図に見られるよりも低く推定されているが、相関図上でのバラツキは小さく、回帰式の勾配も1に近いことから、高い精度で周期を再現し得ていることがわかる。

以上の高波浪時前後の期間を対象とした推算結果より、SWANによる内湾波浪推算は、風波・うねりとも観測値をよく再現しており、SWANの精度の高さが確認できた。しかし、本研究では高波浪時を中心とした短い期間のみを対象に推算精度を比較しているため、より適切にSWANの精度を検討するには、このモデルを用いた長期間の内湾波浪推算結果を蓄積し、比較・検討する必要がある。

6. おわりに

本研究では、従来精度面で問題のあった内湾海上風推算に局地気象モデルを適用、精度を検討した。その結果、

局地気象モデル推算風は観測値の再現性が高く、波浪推算への適用を始め、種々の利用が可能であると確認された。しかし、本研究で使用したモデルは、強い風速の気象擾乱に対し風速が過小評価される傾向があった。今後は、現在、局地気象に関連する分野で広く用いられているMM5やARPS等別のモデルによる内湾風推算も行い、さらに検討を進める予定である。

また、局地気象モデルで推算した内湾海上風を用い、第三世代波浪推算モデルWAM及びSWANによる内湾波浪推算を実施した。その結果、内湾域における各モデルの推算精度や特性が確認できた。現時点では①WAMにより長期間の波浪推算を実施し、当該海域の波浪特性を検討、②SWANにより特定期間の詳細な波浪情報を推定するのが有効であろう。

ただし、今回の検討では、高波浪時の風推算値が元々過小評価であったことから、波浪推算精度の検討は必ずしも適切であったとは言えない。今後も引き続き種々の気象擾乱を対象として、より高精度な海上風を推算し、さらに第三世代波浪推算法の特性を検討してゆく。

参考文献

- 中西幹郎 (1999): 霧の内部構造と予報に関する数値的研究, 東京大学大学院理学系研究科学位論文, pp. 138.
- 鈴木靖・橋本典明 (2001): 局地気象モデルの内湾海上風推定への応用, 日本海洋学会秋期大会講演要旨集, p. 245.
- 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.
- Holthuijsen, L. H. et al. (2000): SWAN Cycle III version 40.11, USER MANUAL.
- The WAMDI Group (1988): The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., 18, pp. 1775-1810.