

内湾域における波浪推算精度向上を目的とした 第三世代波浪推算モデル WAM の改良

川口 浩二*・橋本 典明**・杉本 彰***

近年、外洋を対象にした WAM の推算精度の高さが確認され、我が国でも実務に導入され始めている。しかし、WAM の内湾域への導入には幾つもの課題があり未だ導入が遅れているのが現状である。波浪推算による波浪情報の実務への利用価値は非常に高いが、とりわけ内湾域を対象とする場合、静穏時も含む連続的な波浪推算（常時波浪推算）が必要となる。本研究では、内湾域における WAM の推算精度向上を目的とした改良を行い、局地気象モデルによる内湾海上風を用いて東京湾を対象に 2 年間の波浪推算を実施した。その結果、WAM で考慮するスペクトルの周波数範囲を高周波数側へ拡張することで、内湾域でも精度の良い常時波浪推算が可能となった。

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となってきた。その結果、外洋を対象にした実務では、WAM が導入され始めている。一方、港湾・海岸の事業分野で必要とされる波浪情報の多くは沿岸域や内湾域に集中し、とりわけ内湾域では、荒天時のみならず静穏時も含む波浪（常時波浪）情報が要求される。今後、内湾域の常時波浪情報を経済的かつ省力的に得るためには、信頼性が高く精度の高い波浪推算法の早期導入が期待されるが、内湾域においては実用化に向けた導入が遅れているのが現状である。この原因として、①内湾では外洋に比べて推算精度の検証例が少ないこと、②波浪の推算精度を左右する海上風が沿岸域や内湾域では陸地の影響を受けて複雑になり、より細かな空間スケール（例えば数 km 程度）の海上風データが要求されること、③沿岸域や内湾域では、より複雑な地形や水深変化に伴う波浪の種々の物理メカニズムを考慮する必要があること、などが挙げられる。

本研究では、内湾域における第三世代波浪推算モデル WAM の推算精度向上を目的とした改良を行い、局地気象モデルで得られる高分解能かつ高精度な内湾海上風を用い、東京湾を対象に 2 年間の内湾波浪推算を実施した。さらに、その推算精度を検討し、今後の沿岸域や内湾域での高精度波浪推算法の実用化に向けた検討を行った。

2. 検討方法

間瀬ら (2001)、橋本ら (2002) は、第三世代波浪推算モデル WAM と SWAN を内湾域に適用し、内湾域では SWAN の推算精度が高いことを示した。橋本らは WAM に含まれる波浪の発達を抑えるパラメータ（リミター）を Hersbach・Janssen (1999) に従って浅海に対応するよう修正したが他のパラメータは変更していな

い。また、間瀬らは上記リミターの修正を行わず WAM を適用しており、内湾浅海域を対象とした WAM の推算精度を十分に検討したとは言い難い。一方、同一の計算条件で WAM と SWAN の両者を比較すると SWAN の計算負荷は WAM に比べて極めて高い。今後、常時波浪推算等の汎用的な目的で波浪推算を実施するには、計算時間も重要な要素と考えられるため、計算負荷の小さい WAM を浅海域にも適用できるよう改良する意義は極めて大きい。

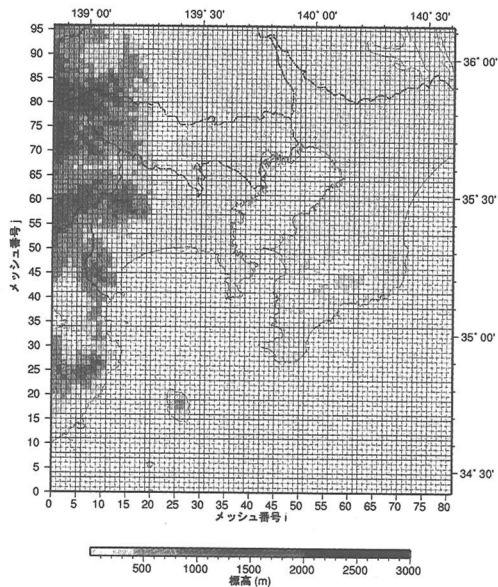
本研究では、WAM の内湾浅海域における常時波浪の推算精度向上を目的とし、WAM に対して、Hersbach・Janssen (1999) が提案するリミターを施し、波浪スペクトルの周波数範囲などの改良を試みた。ついで、東京湾を対象とした局地気象モデルによる内湾海上風の推算を基に常時波浪推算を行い、東京湾内の現地観測データと比較することで、推算精度の検討を行った。なお、対象期間は 1999～2000 年の 2 年間である。

3. 局地気象モデルによる内湾海上風の推算

本研究では、まず初めに、中西 (1999) によって開発された局地気象モデル ANEMOS を用い、1999～2000 年の 2 年間における東京湾での内湾海上風の推算を行った。図-1 および表-1 に対象領域および計算条件を示す。

図-2 は、東京湾で強風が吹いた例として、1999 年 11 月 1 日の前後 2 週間の推算海上風を、東京湾内の 2 地点（千葉港観測塔、東京灯標）における風観測データと比較した図である。上図の矢印は風向（上から推算風、観測風）、下図は風速の時系列図（実線が推算風、破線が観測風）である。まず、風向について見ると、やや差異はあるものの推算風向は観測風向をよく再現していることがわかる。また、風速については、20 m/s を越えるような強風かつピーク時において推算値が過小評価の傾向があるが、期間全体を通した比較では推算風速は観測風速を非常に良く再現していることが分かる。また、ここでは図示していないが、他地点（京葉シーバース、第二海堡）

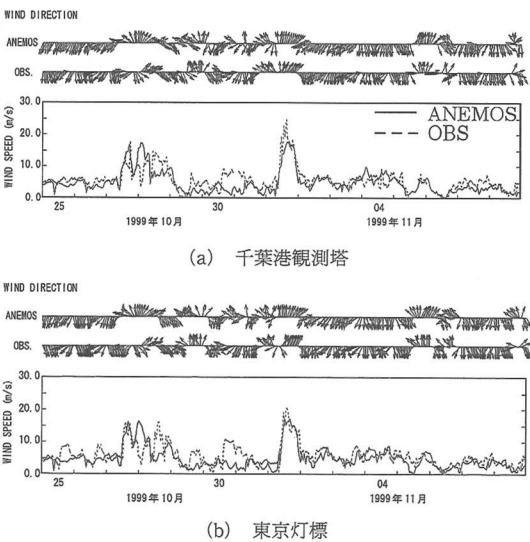
* 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部主任研究官
** 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理研究室長
*** 工修 前 東京久栄(株)設計部



図一 内湾海上風の推算領域

表一 局地気象モデルの内湾海上風の推算条件

項目	ANEMOS
座標系(水平)	直交座標系
座標系(鉛直)	z*座標系
計算領域	162 km×192 km×5.2 km
計算格子数	82×97×21=167,034
水平格子間隔	2 km
時間ステップ	10 sec
側面境界値	GPV；RSM 地上・上層(1時間間隔)
標高データ	国土数値情報 50 m メッシュデータ
地表面境界値	国土数値情報 100 m メッシュデータ
海面温度データ	NEAR-GOOS 海面水温解析値(1日間隔)
ネスティング	なし
計算期間	1999～2000 年 2 年間通年
その他	海上風推算結果をマスコンモデルで補正



図二 局地気象モデルによる推算風と観測風の比較例
(1999 年 11 月 1 日前後の例)

デルによる推算海上風と第三世代波浪推算モデル WAM を用いた内湾波浪推算を実施し、その精度検討を行う。

(1) 第三世代波浪推算モデル WAM による内湾波浪推算

a) 計算条件

本研究では、内湾域(東京湾)を対象(図一1 参照)としているため、Hersbach・Janssen (1999) によるリミターを用いた WAM を基に内湾波浪推算を実施した。計算期間は、内湾海上風の推算と同様に 2 年間とし、波浪の伝播計算の時間間隔は 1 分とした。また、WAM で考慮する方向スペクトルの方向および周波数分割数(範囲)は、外洋の計算で一般的に用いられているデフォルト値を用いた。また、外洋から東京湾内への進入波を考慮するため、大領域、中領域、小領域の 3 段階のネスティングを経て得られた方向スペクトルを境界条件として図一1 で示す境界に与えた。すなわち、日本列島を中心とする 15～63°N, 115～170°E の範囲を大領域とし、さらに中領域を挟んだ後、目的とする東京湾内湾波浪推算に用いる境界値を計算するため、関東地方を対象とする小領域の計算を行った。なお、大～小領域までの計算では、ECMWF から提供される時間分解能 6 時間、空間分解能 0.5 度の客観解析データ(以下では ECMWF 風と記す)を用いた。さらに、水深については、水深による屈折計算を行う際、急激な水深変化による数値発散を防ぐため平滑処理を施した。表二に、これら波浪推算条件をまとめる。

b) 推算結果

図三は、東京湾内で高波浪が発生した事例として、

でも同様の結果が得られた。
以上のように局地気象モデルによる推算風は概して高い再現性を有しており、内湾波浪推算への適用に十分有用であると判断される。なお、本検討で行った海上風の推算精度検証の詳細については、川口ら (2003) を参照されたい。

4. 第三世代波浪推算モデル WAM による内湾波浪推算

本章では、東京湾を対象に、前章で示した局地気象モ

表-2 WAM による内湾波浪推算条件

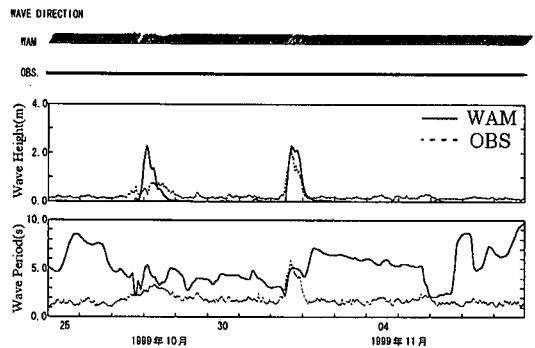
項目	WAM
座標系	球面座標系
計算領域	34.5° - 36.0°N, 139.0° - 140.5°E
格子点数	91×91=8,281 点
格子間隔	1' (約 1.8 km)
時間ステップ	1 分
スペクトル方向領域	0~360°
方向分割数	16 分割
方向間隔	22.5°
スペクトル周波数領域	0.042~0.453 Hz
周波数分割数	25 分割
周波数間隔	倍率 1.1 (対数)
水深データ	平滑化した水深
境界入力	WAM による外洋からのネスティング
その他	浅水計算, 屈折あり

1999 年 11 月 1 日前後における千葉港観測塔および東京灯標における有義波諸元と波向の推算値と観測値の比較結果である。まず、上段の波向から見ると、図-2 から分かるように局地気象モデルによる推算風は観測風の風向・風速を精度よく推算しているにも関わらず、波向の推算値は一方向を示しており適切な結果となっていない。また、有義波波高や周期についても、高波浪の発達期からピークまでの再現性は高いものの、その他の期間の推算精度は必ずしも高くない。特に低波浪時における有義波周期は過大評価の傾向があり、その変動特性も観測値からは想像できない。以上の結果から、浅海域の計算に対応させたりミッターを用いたとしても、元々、深海域を対象としている WAM を常時波浪推算を目的とした内湾域にそのまま適用することは問題があることが分かる。

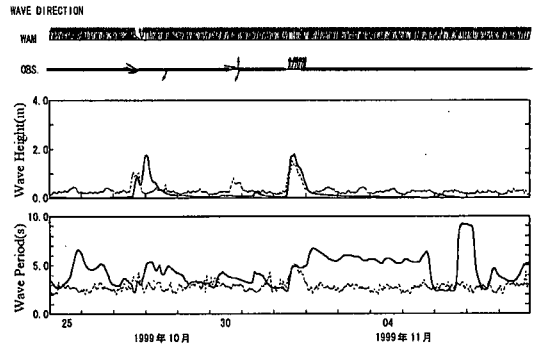
c) 内湾波浪推算の適用性向上を目的とした WAM の改良

局地気象モデルによる内湾海上風を用いた WAM の内湾波浪推算は高波浪時には精度が高いことが示された。しかし、常時波浪推算を対象とする場合、元々、深海域を対象とした WAM をそのまま適用するのは精度上不十分である。そこで、静穏時にも精度の高い内湾波浪推算を実現するため、WAM の改良を行った。

図-4 は、東京湾奥部（波浪発達前の 11 月 1 日 0 時）における WAM の方向スペクトルの推算結果を周波数スペクトルおよび方向分布関数と共に示したものである。図からスペクトルの高周波数側が 0.5 Hz 付近で途切れていることがわかる。この周波数は WAM で考慮しているスペクトル周波数範囲の高周波数側の上限値である。WAM では、予め設定されたスペクトル周波数範囲より高周波数側については、そのスペクトルエネルギーを直接計算せず、-4 乗則を仮定し外挿によって高周波数成分のエネルギーを考慮している。このような外挿によって高周波数成分のエネルギーを与える方法は、スペ



(a) 千葉港観測塔



(b) 東京灯標

図-3 局地気象モデルによる推算風と WAM による波浪推算結果（上から波向・有義波高・有義波周期）

クトルを積分して得られる有義波高を算出する場合には合理的な方法であるが、スペクトル形状に依存する波浪の発生・発達に関する物理過程、すなわち風から波へのエネルギー輸送、砕波などによるエネルギー消散、非線形相互作用によるエネルギー輸送や、スペクトルのモーメントで計算される有義波周期を扱う場合には、この高周波数成分が重要となってくる。もし局所的な内湾海上風によって、考慮している周波数範囲外の高周波数の成分波が発生しているとすれば、その後の波浪の発達状況は違ったと推察される。以上のような理由から、スペクトルの周波数範囲がデフォルト設定されたままの WAM を用いる内湾波浪推算は、特に低風速・低波浪の場合にスペクトルの発達の計算が不適切であると考えられる。そこで、波浪スペクトルの高周波数側のエネルギーをべき則で与えるのではなく、エネルギーを持つ成分波として与えて直接計算できるようにスペクトルの周波数分割数を増やし、周波数範囲を 0.042~1.174 Hz とデフォルト設定よりも高周波数側へ拡張した（以下では、拡張 WAM と記す）。なお、その他の計算条件は表-2 と同様にし、局地気象モデルによる推算風を用いて波浪推算を実施した。

図-5 は、図-3 と同地点・期間における拡張 WAM の推算結果である。図から高波浪時のみならず低波浪時に

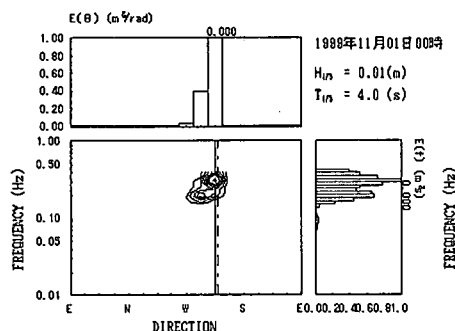


図-4 WAMによる方向スペクトル結果の一例

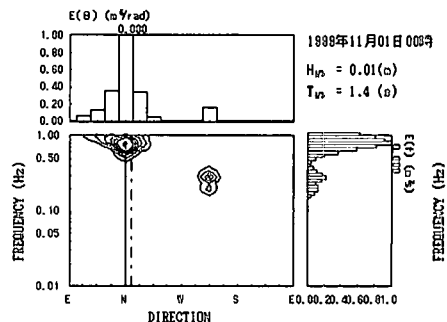
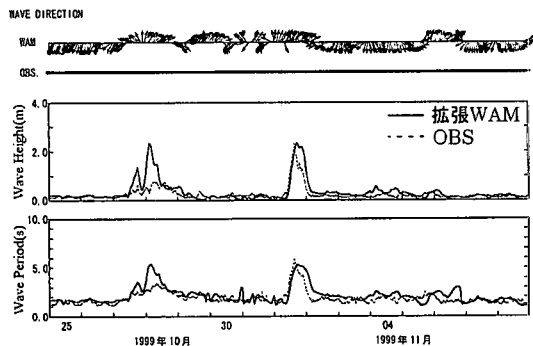
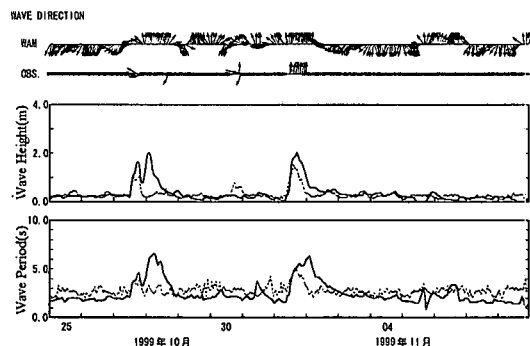


図-6 拡張 WAM による方向スペクトル結果の一例



(a) 千葉港観測塔



(b) 東京灯標

図-5 局地気象モデルによる推算風と拡張 WAM による波浪推算結果 (上から、波向・有義波高・有義波周期)

においても有義波諸元の再現性が向上していることがわかる。特に有義波周期で顕著な精度向上が見られた。また、波向についても改良前は一方向を示していたが、改良後は風場の変化に対応して適切に変化するようになったと考えられる。また、図-6は図-4の同地点・同時刻における拡張 WAM の方向スペクトル結果である。図から分かるように 0.5 Hz を超える高周波数側でも方向スペクトルがきちんと計算されており、図-4 と比べてピーク波数が高周波数側に存在していることが分かる。また、図-4 では一方向波浪であった波浪場が二方向波浪場になっており、図中のピーク波向(実線)や平均波向(一

点鎖線)も変化していることがわかる。

以上のように、内湾域における連続的な常時波浪推算を実施する場合には、方向スペクトルの周波数範囲を高周波数側へ拡張することが有効であり、内湾波浪推算においても、WAM が十分に実用可能であることが明らかとなった。

(2) 第三世代波浪推算モデル SWAN による内湾波浪推算

前節で、WAM のスペクトルの周波数範囲を高周波数側へ拡張することで、内湾波浪推算の精度が向上することが明らかとなった。本節では、比較のために第三世代波浪推算モデル SWAN を用いて同様の計算を行った。なお、SWAN で用いた海上風や方向スペクトルの境界条件等は WAM の場合と同じである。また、SWAN は WAM をベースに浅海～極浅海域の波浪を対象に改良されたモデルであるため、特に前節のような周波数範囲の拡張は行わず、デフォルト設定のまま用いた。

図-7は、図-3および5と同地点・同期間における SWAN の結果である。図最上段の波向をみると、拡張 WAM の結果ほどではないものの、波浪の発生・発達・減衰状況に対応して変化していることがわかる。しかし、有義波諸元についてみると、高波浪時には破線で示す観測値をよく再現しているものの、低波浪時には有義波波高と有義波周期共に不自然な一定の推算値が示されている期間がある。これは、SWAN では、風速が弱く、波浪の発達が十分でない場合、モデル内で何らかの調整(しきい値が設定されている)がなされていると推察される。

(3) 内湾波浪推算における第三世代波浪推算法の適用性の検討

これまでの検討から、高波浪時には、WAM, SWAN 共に精度の高い内湾波浪推算が可能であることが明らかとなった。とりわけ、WAM において周波数範囲を高周波数側へ拡張することで、低波浪時には精度の高い内湾波浪推算が可能となった。今度、常時波浪も波浪推算の対象とする場合、その推算精度はもちろ

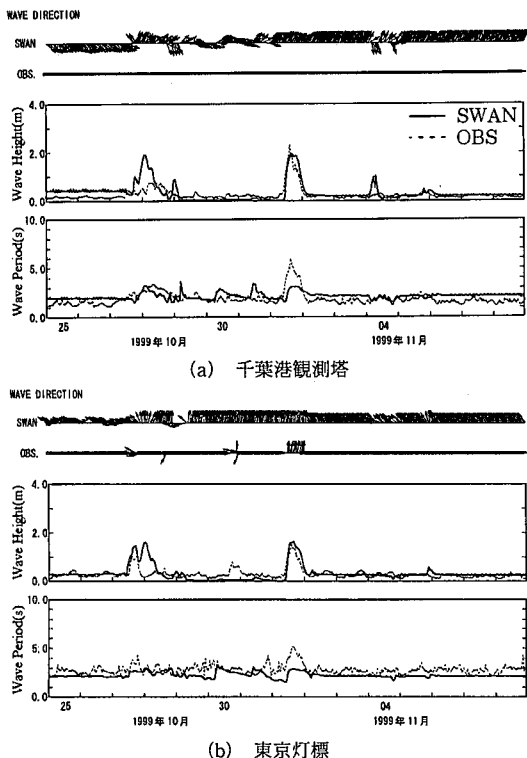


図-7 局地気象モデルによる推算風とSWANによる波浪推算結果（上から、波向・有義波高・有義波周期）

ん波浪推算に要する計算時間も重要となってくる。表-3は、現時点において筆者らが行ったWAMとSWANの適用性に関する検討結果である。すなわち本研究で対象とした東京湾のような内湾域を対象とする常時波浪推算では、モデル自体の改良が容易で、かつ計算処理速度の速いWAMの方が実務上有利であると言える。一方、SWANは3波共鳴による非線形相互作用によるエネルギー輸送や地形性砕波など浅海域特有の物理過程を考慮しているなど多くの機能を有する優れた波浪推算モデルであるが、今回の検討では浅海波浪推算用のオプションを必ずしも有効に利用できていない。今後は、浅海域～極浅海域を対象とした多くの事例に適用し、WAMおよびSWANの適用範囲を明らかにする必要がある。

5. おわりに

局地気象モデルで推算された内湾海上風と第三世代波浪推算モデルWAMを用いて、東京湾を対象に内湾波浪

表-3 WAMとSWANの比較

項目	WAM	SWAN
内湾波浪推算精度	高い	やや高い
計算速度	速い (陽解法)	遅い (反復, 収束計算)
汎用性	普通	高い (オプション多数あり)
計算範囲	深海域～内湾域	内湾・沿岸域 (浅海～極浅海域)
精度 検証例	深海域に多い	少ない
将来性	高い (AD-WAM, ソース改良しやすい)	高い (バージョンアップ が見込まれる)

推算を実施した。その結果、WAMに対し、波浪スペクトルの周波数範囲を高周波数側へ拡張することで内湾域においても精度の高い波浪推算が実施できることが明らかとなった。その結果、静穏時も含めた連続的な波浪推算（常時波浪推算）を実施することが可能となり、本研究で改良したWAM（拡張WAM）は十分実用可能なモデルである。

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。また、海上風および波浪の推算結果検証のため、東京都港湾局、千葉県千葉港湾事務所および千葉シーバース（株）から現地観測データを提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 川口浩二・杉本 彰・橋本典明 (2003): 第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用性—メソスケール気象モデルの導入—, 港空研資料 (印刷中)
- 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.
- 橋本典明・杉本 彰・川口浩二・宇都宮好博 (2002): 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, 海工論文集, 第49巻, pp. 201-205.
- 間瀬 肇・平尾博樹・國富將嗣・高山知司 (2001): 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, 海工論文集, 第48巻, pp. 236-240.
- 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.