

東京湾におけるWAMの波浪推算特性に関する検討

STUDY ON APPLICABILITY OF THIRD GENERATION WAVE MODEL WAM FOR TOKYO BAY

橋本典明¹・川口浩二²・池上正春³・鈴山勝之⁴

Noriaki HASHIMOTO, Koji KAWAGUCHI, Masaharu Ikegami, Katsuyuki SUZUYAMA

- ¹正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋水理研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
²正会員 工修 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 (〒651-0082 神戸市中央区小野浜町7-30)
³前 関東地方整備局 横浜技術設計調査事務所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
⁴工修 (株) エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町10-35)

The third generation wave model WAM, which was originally developed for simulating waves in deep and large open sea area, is applied for Tokyo Bay with introducing some modification and tuning suitable for simulating waves in inland sea area. The wave parameters as well as directional wave spectra in Tokyo Bay are simulated for 4 years from 1998 to 2001 with sea surface wind data computed by using a mesoscale meteorological model. Simulated monthly, seasonal and yearly wave conditions are compared with the observed wave conditions, and applicability of WAM for inland sea area is discussed with demonstrating its high utility.

Key Words : Wave hindcasting, WAM, Tokyo Bay, Inland sea

1. はじめに

近年，第三世代波浪推算法WAMを用いた波浪推算が各所で実施されるようになり，我が国沿岸域における波浪の出現特性が，観測値のみならず推算値を用いても検討されるようになってきた¹⁾。しかしこのような検討の多くは，外洋を対象にした推算値に基づくもので，東京湾のような内湾域を対象とした検討事例は少ない。

本研究では，まず，東京湾内を対象として波浪推算する場合の推算精度向上を目的としてWAMを改良した。次に，改良WAMで推算された推算値と湾内で取得された観測値を比較検討することにより，外洋において使用実績の多いWAMの内湾波浪推算への適用性を検討した。さらに，改良WAMで推算して得られた推算値を用いて波候統計解析を行い，観測で得られた東京湾内における数地点の波候統計値と比較することにより，内湾域を対象とした波候統計解析におけるWAMの有用性を確認した。

で波浪観測が実施されており，波浪推算値の精度検証や波候統計解析結果の検討には，これらの地点で取得された観測値を用いた。

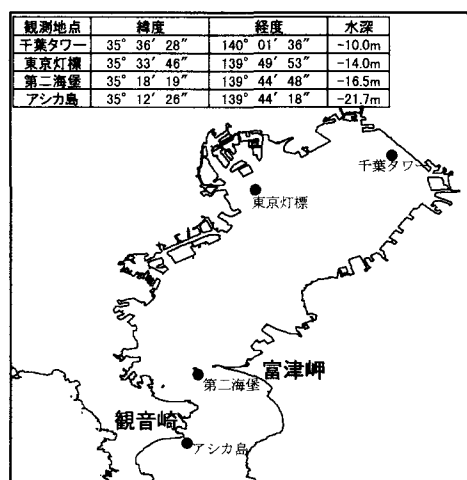


図-1 検討対象海域と波浪観測地点

2. 検討対象海域

図-1は，本研究で対象とする東京湾を示したものである。東京湾内においては，図中に●で示す千葉タワー，東京灯標，第二海堡，アシカ島の4地点

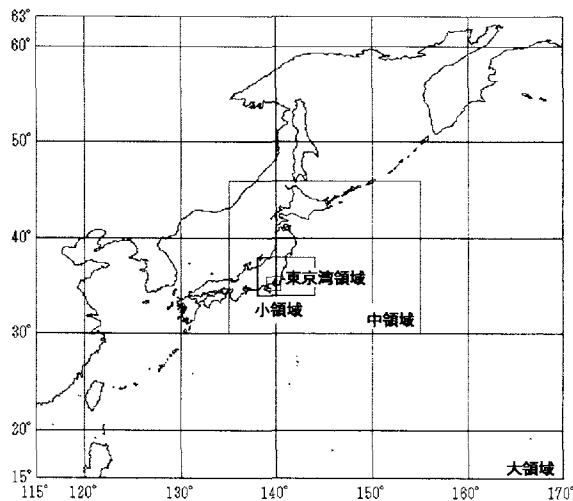
3. 計算条件の設定

(1) 計算領域と計算条件

波浪推算に際しては，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するネスティン

グ手法を採用した。本研究では図-2に示すように日本列島を中心とする北緯15°～63°，東経115°～170°の範囲を大領域とし，中領域，小領域，東京湾領域の4領域を設定した。各領域において設定した計算諸条件を表-1に示す。

なお，デフォルトのWAMでは外洋の波浪推算に適合するようにいくつかのパラメータがチューニングされている。その内の一つに，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がある。このパラメータをそのまま高分解能の時間・空間格子の波浪推算に用いると，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，東京湾領域においては，Hersbach and Janssen²⁾により提案されたリミターを用いた。



	大領域	中領域	小領域	東京湾領域
緯度範囲 (北緯)	15°～63°	30°～46°	34°～38°	34.5°～38°
経度範囲 (東経)	115°～170°	135°～155°	138°～144°	139°～140.5°
格子間隔	0.50°	0.25°	0.05°	1/60°
格子数	111×97	81×65	121×81	91×91
水深情報の有無	無	無	無	有

図-2 計算領域

表-1 各領域の計算条件

		大領域	中領域	小領域	東京湾領域
時間ステップ		1200(sec)	900(sec)	180(sec)	60(sec)
入力風の時間ステップ		6時間			1時間
スペクトル 分割	周波数領域 (対数間隔)	0.042(Hz)～1.174(Hz)			
	周波数分割数	35			
	方向分割数	16 ($\Delta \theta = 22.5^{\circ}$)			
出力時間ステップ		1時間			

(2) 外力条件

波浪推算の推算精度は外力条件となる海上風の推算精度に大きく依存する。したがって，海上風の推算精度が向上すれば波浪推算の精度も向上する。近年，ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts) などの機関から，全球を対象として高精度で高分解能な気象客観解析データが提供されている。一方，東京湾内においては，著者らは，陸地情報 (標高，土地利用等) や様々な気象要素の影響を考慮可能な局地気象モデルANEMOSを用いて

内湾海上風の推算を行い，局地気象モデルによる海上風の推算値は観測風の再現性が高く，内湾波浪推算への利用に有効であることを報告している³⁾。そこで本研究では，外力条件となる海上風データとしては，大領域，中領域，小領域ではECMWFから提供された客観解析データを，東京湾領域では，局地気象モデルにより推算された内湾海上風を用いることとした。

4. 東京湾を対象としたWAMの改良

現在多くの国々で用いられているWAMは，主としてWAM Cycle-4 (以降，WAMC4と呼ぶ) である。我が国においても，WAMC4を用いた外洋波浪推算には多くの使用実績があるが，内湾域において適用された事例は少ない。著者らは以前，東京湾内を対象としてWAMC4により波浪推算を行ったが，その結果，以下のような問題が生じることを確認した。

- ① 高波浪時において湾奥波浪が過大に推算される。
- ② 推算周期が観測周期より長めに推算される。

そこで本研究では，上記①，②の問題を解消するため，以下の2つの改良を行い，東京湾内の波浪推算精度を向上させた。

(1) Wuの式の採用

WAMC4は，WAM Cycle-3 (以降，WAMC3と呼ぶ) で採用されていた風から波へのエネルギー入力項を変更し，Janssenのquasi-linear理論⁴⁾⁵⁾を導入して，波齢の影響を考慮して風から波へのエネルギー輸送量を計算する。すなわち，同じ風場が与えられた場合でも，波齢の大きな波よりも波齢の小さな波の方が風から波へのエネルギー輸送が活発に行われ，波浪が発達しやすい。これにより，波浪の発達が風速のみならず海面状態にも依存することになり，より現実に近い定式化になった。

しかし，東京湾領域のような狭い領域で，地形の影響等を強く受け，非定常で局所的な風場を対象として波浪推算する場合には，quasi-linear理論では波浪が異常発達する場合がある。そこで本研究では，東京湾内を推算する際の風から波へのエネルギー輸送量の計算には，以前にWAMC3で採用されていたWuの式を用いることとした。

(2) 富津岬の地形の適切な考慮

内湾における波浪推算では，湾の地形条件をいかに正確に考慮するかによって，推算精度が大きく異なる。特に東京湾奥の波浪推算においては富津岬の影響が大きい。著者らが以前に行った検討では，図-3中に黒四角で示す富津岬先端部付近の標高が極めて低いことから地形条件が適切に考慮されていなかった。このため，湾口から浸入するうねり成分の一部が遮蔽されずに直接湾奥に到達し，湾奥波浪が過大に推算される問題が生じた。そこで本研究では，種々検討した結果，図-3に示す格子分だけ富津岬を考慮することとした。

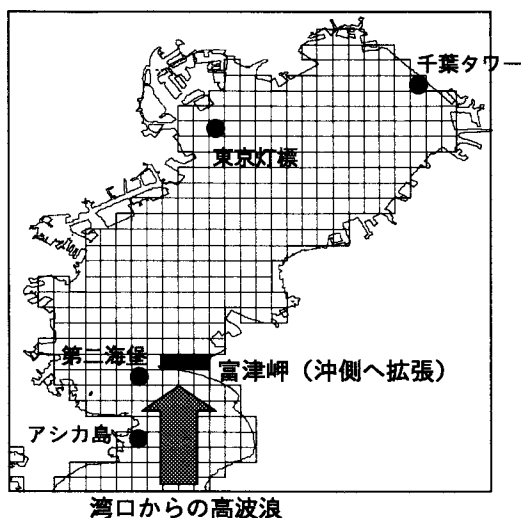


図-3 富津岬の地形近似

(3) 波浪推算精度の検証

前記の2つの改良を行った改良WAMを用いて波浪推算を行い、観測値および著者らが以前に行った推算結果と比較することにより、改良WAMの推算精度を検討した。図-4(1),(2)は、湾奥の千葉タワーと東京灯標の1999年6月における高波浪時の観測値と推算値を示したものである。各図の上図が波高、下図が周期の経時変化を表す。図中の白丸が観測値、改良前推算値は著者らが以前行った推算結果、改良後推算値①がWuの式を採用した推算結果、改良後推算値②がWuの式と富津岬の地形を適切に考慮した推算結果である。すなわち、改良前推算値と改良後推算値①の比較からWuの式を採用した効果が、改良後推算値①と改良後推算値②の比較から富津岬を考慮した効果が検討できる。

図-4(1)より、千葉タワーでは改良前の波高・周期の推算値は高波浪時に観測値と比較して過大に推算されている。一方、改良後推算値①、②では波浪の過大推算の傾向が改善され、波高・周期とも観測値に近づく。低波浪時の波高については改良WAMの効果はほとんど見られず、周期については若干改善が見られるものの、推算周期が観測周期より長めに推算される傾向は同じである。

図-4(2)に示す東京灯標では、千葉タワーと同様に、改良WAMでは高波浪時において波浪が過大に推算される傾向が改善され、波高・周期ともに観測値と比較的よく一致する。特に、千葉タワーではあまり顕著でなかった富津岬による改善効果が顕著に現れている。すなわち、特に高波浪時には、改良後推算値①と改良後推算値②の差が大きくなり、富津岬の遮蔽効果を考慮したことによる波高・周期の減衰効果が現れる。一方、低波浪時の場合には改良WAMの改善効果は顕著には見られないが、周期については観測値に一致するように改善されている。当然であるが、富津岬の影響を考慮した影響は、富津岬より西側の湾口付近に位置する第二海堡とアシ

カ島ではほとんど見られない。

なお、ここでは示していないが、湾口付近の第二海堡においても、Wuの式を導入したことにより波浪が過大に推算される傾向が改善された。また、アシカ島では、Wuの式の導入により波高がやや過小に推算される傾向があったが、千葉タワー、東京灯標、第二海堡に比べその影響は小さい。

以上のように、WAMに2つの改良を導入することにより東京湾内における推算精度が向上した。このように、主として外洋波浪推算を目的として開発されたWAMであるが、適切な改良を行うことによって、内湾域の波浪推算精度を向上させることができ、実用上有用であることが確認された。

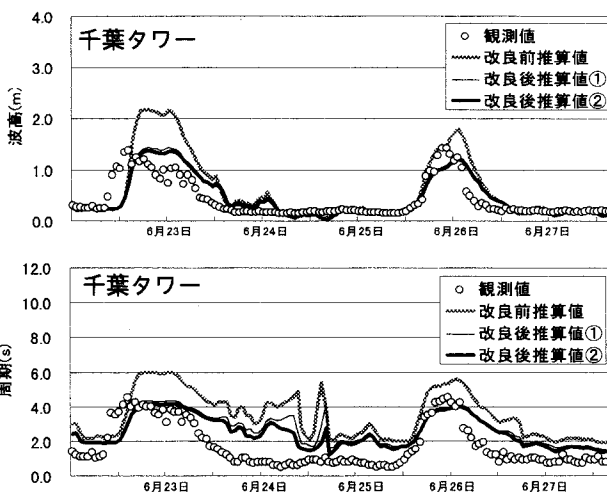


図-4(1) 改良WAMの推算精度の検証 (千葉タワー)

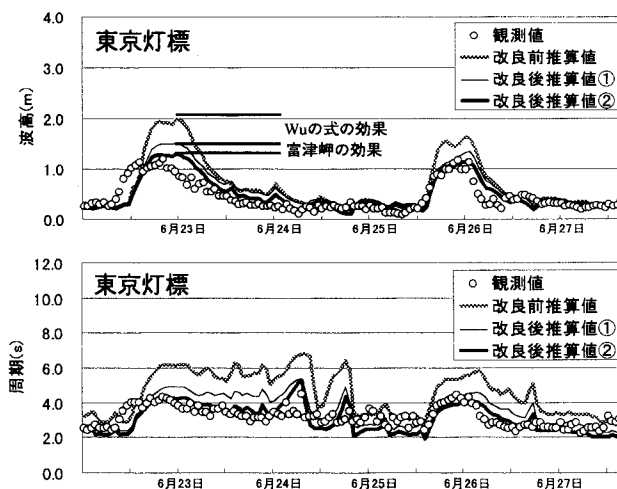


図-4(2) 改良WAMの推算精度の検証 (東京灯標)

5. 東京湾の波浪特性に関する検討

改良WAMにより1998～2001年の4年間を対象として波浪推算を行い、推算値と東京湾内4地点の観測値を用いて波候統計解析を行い、東京湾の波浪特性を検討した。

(1) 波高, 周期の階級別出現頻度

図-5は、改良WAMによる推算値と観測値の波高, 周期の階級別出現頻度の比較図である。左図が0.1m刻みの波高階級別出現頻度, 右図が1.0s刻みの周期階級別出現頻度であり, 図中の白丸が観測値, 黒丸が推算値の出現頻度を表す。図では, 出現頻度の小さい高波浪時についても観測値と推算値の相違が明確に判別できるように縦軸の頻度を対数表示している。なお, 波高10cm未満および周期1.0s未満の出現頻度については, 観測精度, 推算精度とも信頼性が高いとは言えず, 検討は無意味と考え, 出現頻度の表示は行っていない。

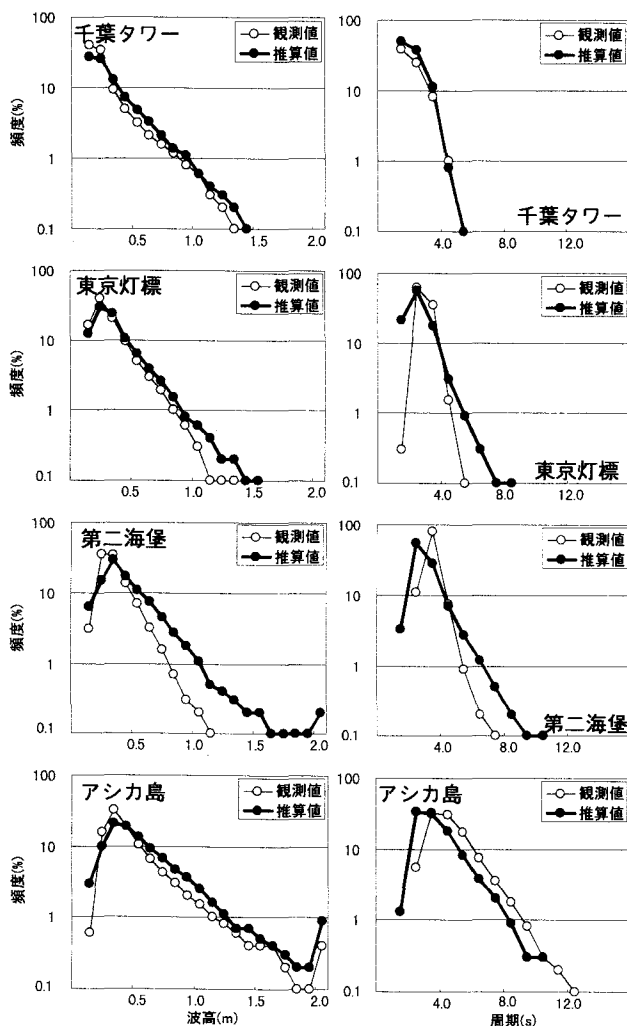


図-5 観測値と推算値の波高(左図), 周期(右図)の階級別出現頻度の比較

千葉タワーでは, 推算値と観測値の波高, 周期の出現頻度の分布傾向はよく一致している。

東京灯標では, 波高1.0m以上の階級で推算値の出現頻度が若干高くなっているものの, 観測値と推算値の波高出現頻度の分布傾向はよく一致している。また, 周期1.0s~2.0sの階級で観測値と推算値の出現頻度に差があるが, 2.0s以上の周期階級では, 観測値と推算値の周期出現頻度の分布傾向は概ね一致している。

第二海堡の観測値と推算値の波高出現頻度分布は, 0.5m以上の波高階級で, 推算値の出現頻度が数%高くなっている。特に, 推算値には観測値には見られない2.0m以上の波高が存在している。これは, 波浪推算における観音崎の地形の影響によるものと考えられる。すなわち, 観音崎周辺海域では, 実際には湾外から進入してくる波浪が屈折, 浅水変形や遮蔽等の地形の影響を受けると考えられる。しかし, 本研究で用いた計算格子では, このような影響を適切に考慮できないためである。周期については, 1.0s~2.0sの階級について観測値と推算値の出現頻度に差があるが, 観測値と推算値の周期出現頻度の分布傾向は概ね一致している。

アシカ島については, 0.1m~0.2mの低波浪時の波高階級について観測値と推算値の出現頻度に差がある。しかし前述のように, 波高0.2m未満の低波浪時には観測精度, 推算精度とも信頼性があるとは言えないことから, 直接的な比較は無意味であろう。0.2m以上の波高階級では, 観測値と推算値の波高出現頻度の分布傾向はよく一致している。周期については, 観測値と推算値の出現頻度の分布傾向は概して一致しているものの, 周期階級が平行にずれた分布形状になっている。この原因として, 改良WAMにおいてはWuの式を採用したことにより, 周期がやや短めに推算されたためと推察される。アシカ島では他の観測地点に比べて, 外洋から進入する波浪の影響を受けやすいと考えられるが, この影響によるものかも知れない。

以上の検討結果から, 東京湾を対象として波浪推算により算出された波高, 周期の出現頻度は, 概して観測値の特性をよく表現できていると言えよう。

(2) 有義波諸元の平均値と標準偏差

図-6は, 東京湾内の4地点の有義波諸元(波高, 周期)の通年および季別の平均値と標準偏差を示したものである。●および◆が推算値による波高, 周期の平均値, ○および◇が観測値による波高, 周期の平均値である。

図より湾奥の千葉タワーおよび東京灯標では, 推算値と観測値の統計値は, 季別, 通年ともよく一致している。平均波高について見ると, 冬季および秋季では0.2m程度, 春季, 夏季では0.3m~0.4m程度の波浪が発生しており, S系風が卓越する夏季の平均波高が最も大きくなる。また, 標準偏差を見ると, 台風の影響等が考えられる夏季が, 他の季節と比較して若干大きくなっているものの, 標準偏差の値自体は小さく, 外洋波浪に比べて台風や移動性低気圧等の大きな擾乱の影響が小さいことがわかる。周期については推算値の方がやや長めであるが, 推算値と観測値の季別と通年の相対的な変化傾向は概ね一致している。

湾口付近の第二海堡では, 波高については季別, 通年ともに推算値が観測値より大きい。これは図-5で示したように, 0.5m以上の波高階級では推算波高出現頻度が観測波高出現頻度に比して数%高いた

めである。しかし、推算値と観測値の季別・通年の相対的な変化傾向は概ね一致している。周期についても、季別、通年ともに相対的な変化傾向は概ね一致している。アシカ島の波高についても、推算値の平均値が観測値より若干大きいものの、第二海堡と同様に、季別、通年の相対的な変化傾向は一致している。なお、アシカ島の波高の標準偏差は他の3地点と比較して大きい。これは、アシカ島が湾口に位置し、S系風の場合には外洋から浸入するうねり性の高波浪の影響を受けやすく、逆に、N系風の場合にはそれほど発達しない低波浪の影響によるものであろうと推察される。すなわち、風向によってアシカ島に來襲する波浪の性質は異なり、高波浪、低波浪の変動が大きいためである。周期については、推算値が観測値の平均値より若干小さくなるものの、季別、通年ともに相対的な変化傾向は一致している。

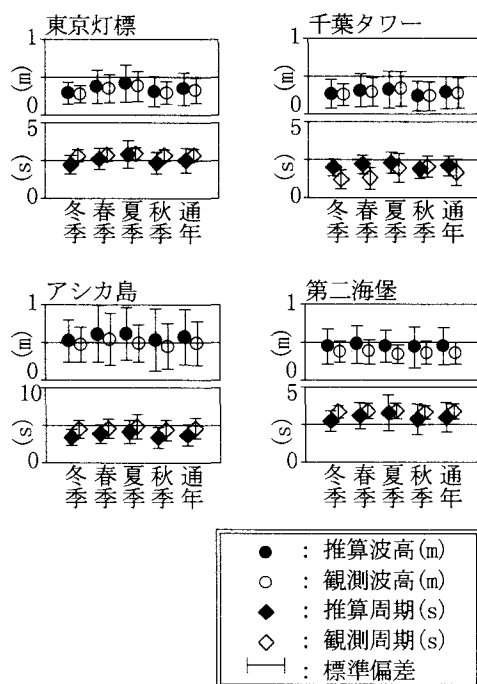


図-6 東京湾における有義波諸元の平均値と標準偏差

(3) 東京湾における波向の出現特性

東京湾内では、東京灯標においてのみ、有義波高が50cm以上の時に限り波向が取得されている。そこで、この観測波向と有義波高50cm以上の推算波向の出現特性を比較した。出現特性の比較は、風の出現特性や波向の出現特性が大きく異なる冬季と夏季について行った。

図-7の上図は冬季、下図は夏季の波高階級別波向特性を示しており、凡例に従って5つの波高階級に分けて出現頻度を示している。それぞれ左図が観測値、右図が推算値である。

冬季の東京灯標ではS方向の波向が卓越し、次にSSW方向およびE方向の波向が卓越する。S方向とE方向は東京灯標に対しては吹送距離が長く波浪が発達する方向である。なお、WNW～ENE方向にも波向の出現が見られるが、これは冬季に卓越する北北

西(NNW)～北北東(NNE)の風による波浪であり、冬季に顕著に見られる特徴である。一方、推算値では、NW、NNW方向とSSW、SW方向の波向が卓越している。推算値でNNW方向の波向が卓越した理由として、波浪推算では外洋から進入するうねり成分の影響よりも、北北西(NNW)～北北東(NNE)の冬季の風の影響が強く現れたためと推察される。

夏季の東京灯標ではS方向の波向が卓越し、次いでSSW方向波向が卓越しており、E方向の波向も出現している。夏季では、冬季に見られたN系波浪の出現はほとんど見られない。前述したように、冬季では北北西(NNW)～北北東(NNE)の風が卓越するが、夏季では南(S)～南西(SW)の風が卓越するためである。推算値についても、観測値と同様にS方向の波向が卓越し、次いでSSW方向の波向が卓越している。

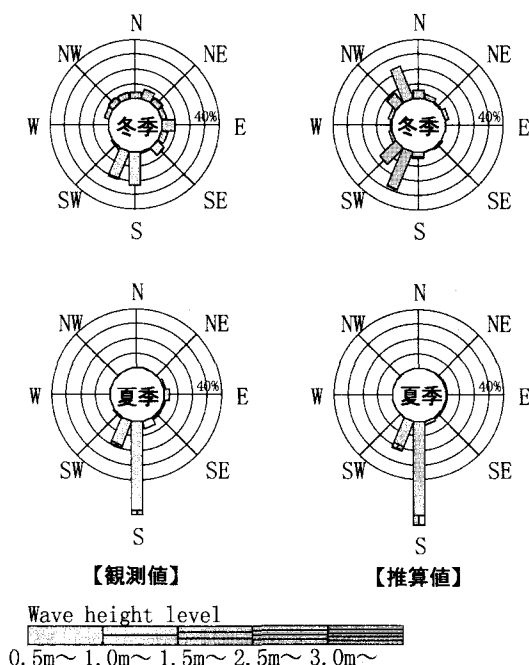


図-7 東京灯標における波向出現特性の比較
(上図：冬季、下図：夏季、
左図：観測値、右図：推算値)

(4) 東京湾における波浪分布特性

図-8は、東京湾内の風の出現特性が大きく異なる冬季と夏季の波浪の平均分布特性を示すものである。左図は有義波高、中図は5秒以上20秒未満のエネルギー成分から換算した波高成分、右図は5秒未満の波高成分の平面波高分布を表すもので、上段は冬季、下段は夏季の平均波高分布である。

冬季の0.4mの等値線は千葉県沿岸(木更津市、袖ヶ浦町の沿岸)付近に位置しており、東京湾の東側で波高が高い。これは、東京湾で冬季に卓越する

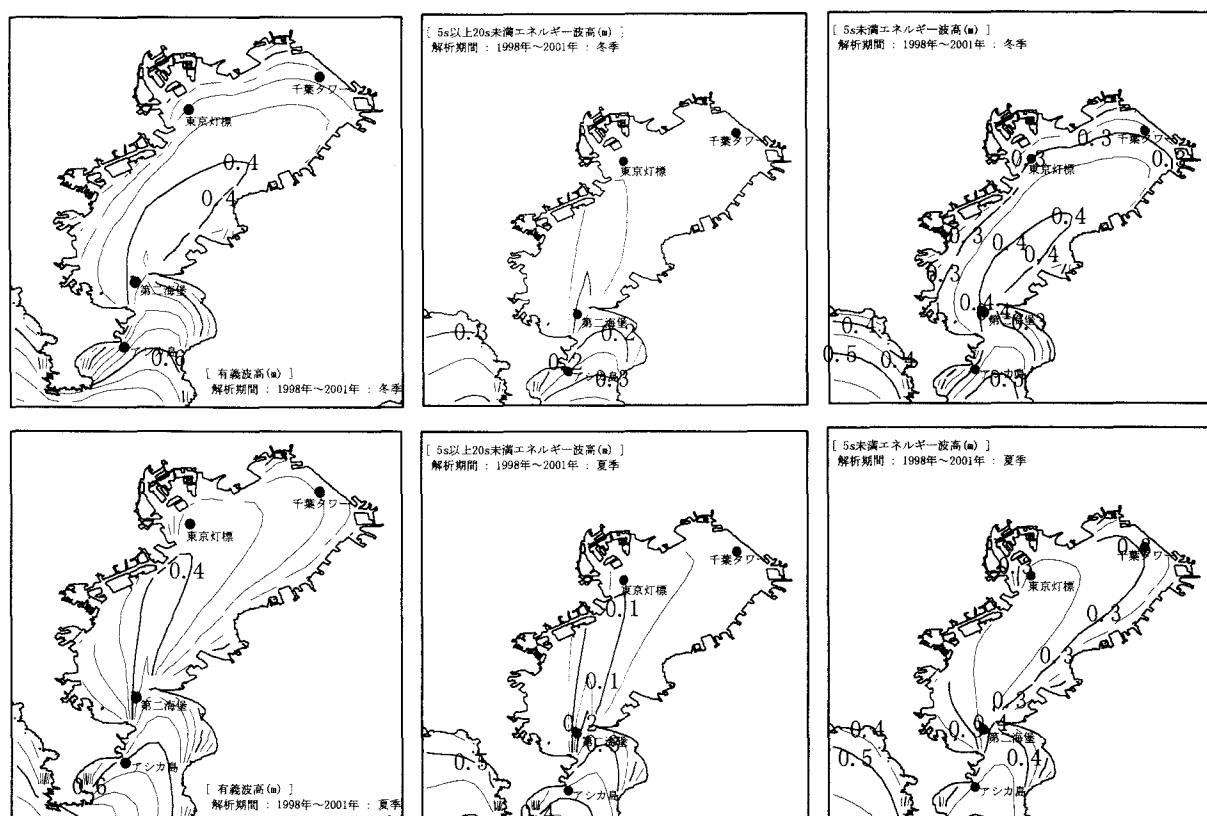


図-8 東京湾における有義波高とエネルギー波高の平面分布 (上図：冬季，下図：夏季)

北北西 (NNW) ～北北東 (NNE) の風に対して、千葉県沿岸沿いの方向が最も長い吹送距離になるためである。一方、夏季の0.4mの等値線の範囲は冬季と比較して西側の湾中央付近に位置している。夏季では南 (S) ～南西 (SW) の風に起因してS系波浪が卓越し、冬季に卓越するN系の波浪がほとんどないためである。

5s以上20s未満の波高成分の分布特性を見ると、冬季の東京湾内にはこの周期帯の波浪成分はほとんど見られないが、夏季には東京湾内の広い範囲でこの周期帯の波浪成分が見られる。これはS系風に起因する外洋から浸入するうねりの影響によるものである。図に見られるように、湾奥に位置する東京灯標でもこの周期帯の波浪成分は存在するが、千葉タワーではほとんどない。

5s未満の波高成分の分布特性を見ると、この周期帯の波浪成分は、冬季で大きく、夏季では小さくなる。これは冬季のN系風の影響によるものであり、S系風が卓越する夏季においては小さくなる。

6. おわりに

本研究では、東京湾内の波浪推算精度が向上するようにWAMを改良し、推算値と観測値を比較して推算精度の改善効果を確認した。

さらに、改良WAMによる推算値と観測値を用いて波候統計解析を行い、それらの統計値を相互比較

することにより、東京湾のような内湾域においても波浪推算値を利用して、月別・季別・通年等の信頼性の高い長期波浪統計値を得ることが可能であることを確認した。

謝辞：本研究では、波浪推算の実施に際し、ECMWFから提供された海上風の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京葉シーバース (株) から現地観測データを提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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，海岸工学論文集，第49巻，pp.201-205.
- 4) Janssen, P. A. E. M. (1989): Wave-induced stress and the drag of air flow over sea wave, J. Phys. Oceanogr., 19, p.745-754.
- 5) Janssen, P. A. E. M. (1991): Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, J. Phys. Oceanogr., 21, p.1631-1642.