

東京湾における長期の波浪特性の推定

ESTIMATION OF LONG TERM WAVE CONDITIONS IN TOKYO BAY

日野幹雄¹・山口正隆²・畑田佳男³・大福 学⁴・野中浩一⁵

Mikio HINO, Masataka YAMAGUCHI, Yoshio HATADA,
Manabu OHFUKU and Hirokazu NONAKA

¹正会員 工修 テクノシステム株式会社 (〒693-0034 島根県出雲市神門神門町735-3)

²正会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科教授 生産環境工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3)

³正会員 博(工学) 愛媛大学大学院理工学研究科講師 生産環境工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3)

⁴愛媛大学工学部 技術専門職員 環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

⁵正会員 博(工学) 愛媛大学契約職員 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

Wave hindcasting at each of 5 points located in Tokyo Bay area is conducted consecutively over a year period of 26 years from 1979 to 2004 using a backward ray tracing model on a nested grid with very high space resolution. Hourly wind distribution is provided with the ECMWF analysis/reanalysis surface winds-based data set in the open sea and the measurement winds-based data set in the nearshore area including Tokyo Bay. Comparison between hindcasts and measurements is made for both time variation of waves and wave climatic parameters. The main conclusions are that the model gives reasonable estimates for the wave height conditions in the inner bay area and that the model demands an input wind data with an improved time resolution in the open ocean for a better evaluation of wave conditions in the outer bay area.

Key Words : Tokyo Bay, measured winds, long term wave hindcasting, high space resolution

1. 緒言

わが国で最も人口が集中し、最も活発に種々の経済活動が行われている東京湾において波浪の長期特性を明らかにすることは当該湾域の防災のみならず開発・保全・利用の面からも意味あることと考えられる。これに関連して、東京湾における長期の波浪についての最近の推算研究には、局地気象モデル (ANEMOS) と第3世代波浪推算モデルWAMを用いて高地形解像度波浪推算を行った橋本ら^{1),2)}や川口ら³⁾の事例があるが、彼等の推算精度を表すための図はあまり明確でないうえに、最長4年(1998~2001年)という期間は統計的に安定した波候を評価するうえで、長いとは言えない。

本研究では、東京湾の任意地点における長期の波浪特性を高い精度で推定しうる波浪推算システムを構築することを目標として、1979~2004年の26年間にわたり複数の海上地点および沿岸地点で1時間ごとに取得された風観測資料に空間補間法⁴⁾を適用することによって、関東沿岸海域における海上風分布のデータセットを作成したのち、これを入力条件とした1点浅海モデル⁵⁾による高地

形解像度長期波浪推算を東京湾の5波浪観測地点で個別に実施し、波浪時系列および各種波候統計量に対する観測資料との比較に基づいて推算精度を明らかにする。

2. 東京湾における海上風分布

(1) 風観測資料

図-1は海上風分布の推定に使用する22風観測地点の番号(1~22, 印), ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) による6時間間隔の表面風解析・再解析資料の1時間間隔線形補間値に、楕円型気圧分布を仮定する場合の1時間間隔台風モデル風を組み込んで得たECMWF風資料⁶⁾の4入力地点番号 (ECM1~ECM4, 印), 海上風分布を推定する途中の段階で仮想的に設置した12風計算地点の番号 (V1~V12, 印), および波浪推算対象地点とする波浪観測地点の番号 (W1~W5, 風観測地点と重複する地点は 印, 波浪観測単独地点は 印) を示す。22風観測地点のうち、海上風観測地点とみなせる地点 (地点番号) は東京灯標 (1) をはじめ9地点であり、東京湾内に7地点 (同一の

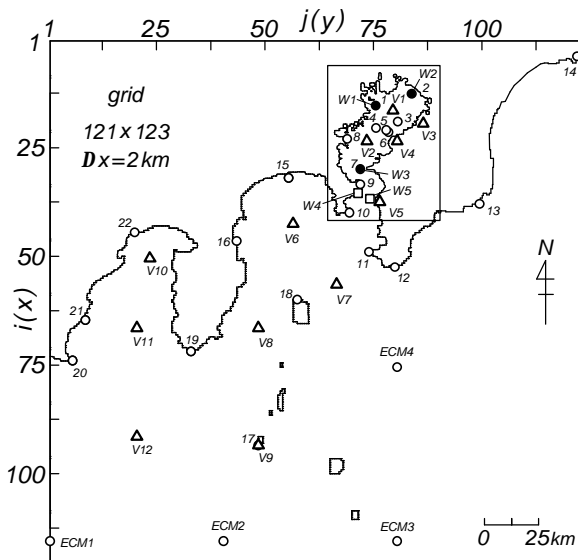


図-1 風資料入力地点および波浪観測地点の位置

期間では5地点)が集中する。残りの13地点のうち11地点は灯台である。また、外洋ではかなり高い精度を有するECMWF風資料を4地点で使用し、外洋と沿岸海域における風特性の滑らかな接続をはかる。

海上風分布の推定期間はECMWF風資料の期間に合わせて1979年1月1日～2004年12月31日の26年とし、利用可能な風資料を全部利用する。しかし、期間全体について観測資料が得られる風観測地点の数は全般的に古い時点ほど少なくなる。そのため、推定した海上風分布資料は年とともに資料の等質性が変化する、いわゆるcreeping inhomogeneityを伴うけれども、本研究ではこの影響を考慮しない。各風観測地点の海上風速 U_{10} は、観測風速に対する1/7乗則の適用によって10 m高度風速を得たのち地形特性を考慮して経験的に決めた定数(1.0～1.1)を乗じて求める。風向は変換の影響を受けないとする。

(2) 海上風分布の推定法

図-1に示す最大22風観測地点および4ECMWF風資料入力地点における最長26年間に及び10 m高度換算海上風の1時間間隔資料を用いて、つぎの順序で海上風分布のデータセットを作成する。

最大26地点における風速資料および風速成分資料にそれぞれ加重1次補間法⁴⁾を適用して、図-1に印で示した12仮想地点(地点17とV9は重複)における風速・風向の1時間間隔資料を26年間にわたり作成する。

12仮想地点を含む計37地点における累年平均風速を計算したのち、地点間の累年平均風速比を参照してそれぞれ経験的に決めた係数(1.05～1.2)を12仮想地点における風速に乗じることによって風速を増強する。これは開けた海上部で風速が周囲の沿岸部より強い特性を考慮

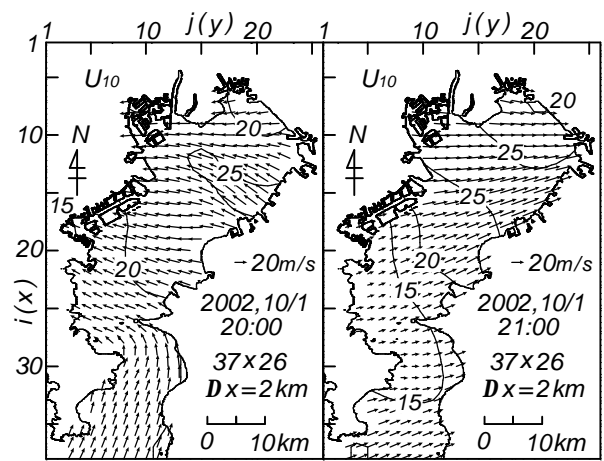


図-2 海上風分布の事例

するためである。風向は得た値とする。

12仮想地点を加えた最大37地点における1時間ごとの風速と風速成分の各資料に加重1次補間法⁴⁾を再度適用して、図-1に与えた格子間隔2 kmの格子網上の風速・風向資料を求め、データセットを作成する。

(3) 海上風分布の特性

本研究では、図-1の全範囲で海上風分布が得られているが、ここでは東京湾における波浪を検討することから、海上風分布の取り出し範囲を図-1に枠で囲った領域とする。図-2は首都圏を直撃した台風0221号時の海上風分布を2002年10月1日20時と21時の2時刻について示す。1日20時に相模湾上に位置した台風に伴うE寄りの風向をもつ渦状風分布は、台風が通過し領域外に去った21時には180°近く風向を急変させ、風向SWの風の場に変化する。風速はいずれの時点でも湾奥で大きい。

図-3は冬季と夏季における26年間の平均風速 \bar{U}_{10} と風向の空間分布を示す。冬季には風向NW～N、風速5～6 m/sで湾外に向けてS方向に増加する風の場、夏季には風向S～SSE、風速4.5～6 m/sで湾奥に向けて増加する風の場となっている。風向の場は季節ごとに大きく変化するが、風速の場はあまり差を生じない。他の季節を含めると、冬、春、秋の3季節におけるN寄りの風の場と夏季のS寄りの風の場に分類される。

3. 東京湾における波浪の観測資料と推算方法

(1) 波浪観測資料

富津岬 - 観音崎以北の東京湾内には、東京灯標(水深15 m, 資料期間1983年1月1日以降)と千葉(港)観測塔(10 m, 1994年1月1日以降)、湾内外の境目には第2海堡(16.5 m, 1991年1月1日以降)、湾外にはアシカ島(21.7 m, 1992年1月1日以降)の波浪観測地点が存在す

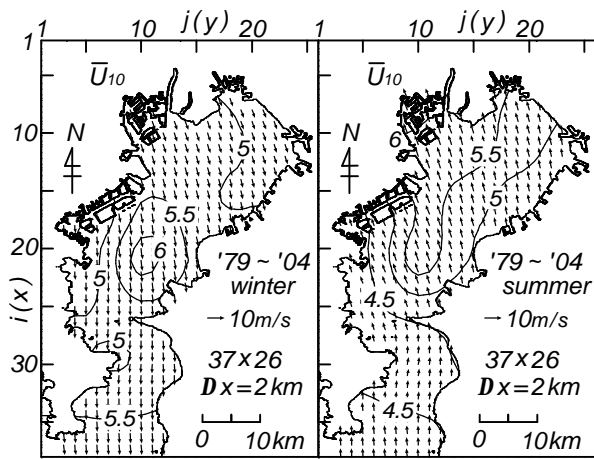


図-3 冬季と夏季における平均風の分布

る。また、かつて湾外の浜金谷（水深22.5 m，1974年1月1日～1990年9月30日）でも観測が行われていた。これらの地点の位置は図-4の印で与えられる。

観測資料は有義波高 H_s ，有義波周期 T_s にほぼ限られており，平均波向資料は東京灯標で有義波高 H_s 0.5 m の場合に取得されているだけである。時間間隔は東京灯標（1990年10月1日以降）と千葉観測塔で1時間，東京灯標（1990年10月以前）と他の3地点で2時間である。

(2) 波浪推算の方法

波浪の長期推算には，1点浅海モデル⁵⁾を使用する。波浪推算の領域は図-4に示すように，北西太平洋大領域（格子間隔5 km），関東沿岸中領域（格子間隔1 km）および東京湾小領域（格子間隔100 m）よりなる3段階高地形解像度格子網で構成される。波浪推算の対象地点は東京灯標，千葉観測塔，第2海堡，アシカ島，浜金谷の5地点である。

計算に用いる周波数データの個数は0.05～1 Hzを不等分割した27個，方向データの個数は0～360°を10°で等分割した37個である。ただし，周辺地形が複雑な第2海堡では，方向に関する間隔を5°，方向データの個数を73個とする。計算時間間隔は対岸距離が短い東京灯標と千葉観測塔で10分，それ以外の3地点で30分とする。

海上風は大領域では北西太平洋に設けた80 km格子網上で1時間間隔のECMWF風資料⁶⁾，中領域と小領域では関東沿岸領域に設けた格子間隔2 kmの格子網（図-1）で1時間間隔の風観測資料に対する空間補間により得た海上風分布資料である。各成分波の波向線上に設けた波計算点における風は，波計算点が2 km格子網の範囲内にある場合には2 km格子点における風観測資料に対する4点双1次補間式の適用により，2 km格子網の範囲外にある場合には80 km格子点上のECMWF風資料⁶⁾に対して同様の方式により算出する。風は1時間の間一定として，

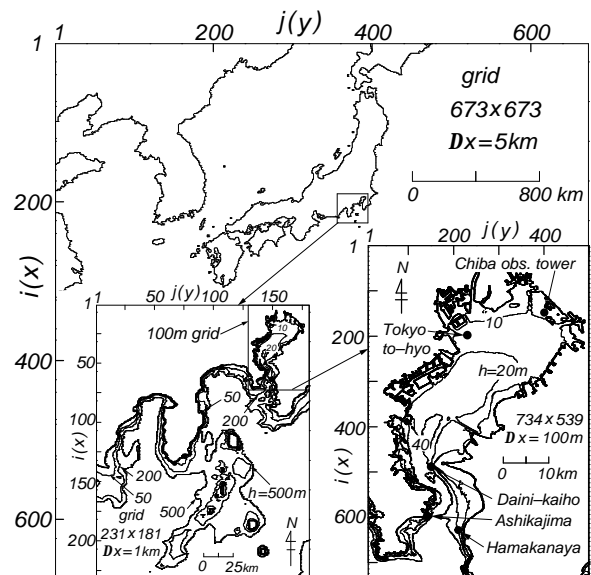


図-4 波浪推算領域

時間に関する補間を行わない。波浪推算は1979年1月1日～2004年12月31日の26年間にわたり実施し，波浪推算地点における有義波高 H_s ，有義波周期 T_s ，平均波向 \bar{q} ，風速 U_{10} ，風向 q_w の1時間間隔値を記憶させる。

4. 波浪推算資料と観測資料の比較

(1) 波浪時系列

図-5は東京灯標と千葉観測塔における1999年11月1日の前後1週間の波浪時系列^{1),2)}について推算結果 (cal.) と観測結果 (obs.) の比較事例を示す。波高に関して，両地点における推算資料はともに急激な増減を繰り返す観測資料によく追従する。一方，周期に関して推算資料は観測資料に現れる細かい変動を含まず，観測資料より緩やかに変化する。また，千葉観測塔における周期観測資料は高波浪時を除いて，推算資料よりかなり小さい値をとる。千葉観測塔における波浪観測資料は東京灯標の資料と異なりToba⁷⁾の3/2乗則をほとんど満たさないことから，とくに周期観測資料の信頼度はかなり低いと考えられる。したがって，これを今後の検討対象としない。

図-6は波高および周期の推算資料と観測資料の散布図および相対出現頻度の等値線を東京灯標において示す。各図には，誤差指標である相関係数 (r_H ， r_T)，原点を通る相関直線の勾配値 (a_{0H} ， a_{0T})，2乗平均平方根誤差 (s_H ， s_T) を与える。また，周期の観測資料には不適切と思われる資料が少なからず含まれるので，Toba⁷⁾の3/2乗則によって計算される周期 $(T_s)_{Toba}$ の0.5～1.5倍を適正な周期資料として採用している。波高に関して，推算資料は観測資料と平均的によい符合を示す。累年波高誤差指標で見れば，相関係数は $r_H = 0.847$ ，相

関直線の勾配値は $a_{0H} = 0.989$, 2乗平均平方根誤差は

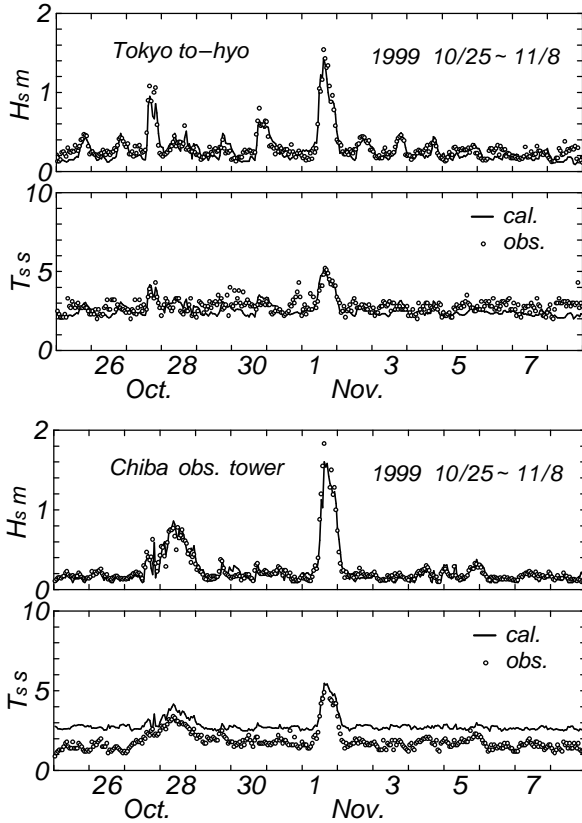


図-5 波浪時系列の比較

$s_H = 0.10$ mであるから、推算資料と観測資料は全体としてかなりよく整合する。しかし、高波高部で推算資料は観測資料より低い値を与える傾向にある。周期に関しては、推算資料と観測資料は平均的に符合するものの、推算周期資料が約2.5 s以下の場合、種々の雑音の影響を受けやすい観測周期資料は2~5 sの範囲の値をとるものも少なくないことから、散布図において個々の資料点が幅広く分布し、その結果として相関係数 r_T は大きくなる。

(2) 累年波候

図-7は5波浪観測地点における推算資料および観測資料より得た波高と周期に関する累年波候統計量および累年波候誤差指標を示す。累年波候統計量は有義波高 H_s と有義波周期 T_s のそれぞれについて上位1/10の資料の平均値 (1/10最大平均値 H_{s10} , T_{s10}) , 上位1/3の資料の平均値 (1/3最大平均値 H_{s3} , T_{s3}) , 全資料の平均値 (H_{sm} , T_{sm}) と標準偏差 (H_{ss} , T_{ss}) に相当する。波高に関して、推算資料と観測資料から得たいずれの波高統計量も湾内の東京灯標と千葉観測塔や湾内外境目の第2海堡でよく符合するが、湾外のアシカ島と浜金谷では推算資料に基づく波高統計量が観測資料に基づく結果よりやや大きい。後者の傾向は入力条件として与える

ECMWF風資料の時間解像度 (6時間) が不足している

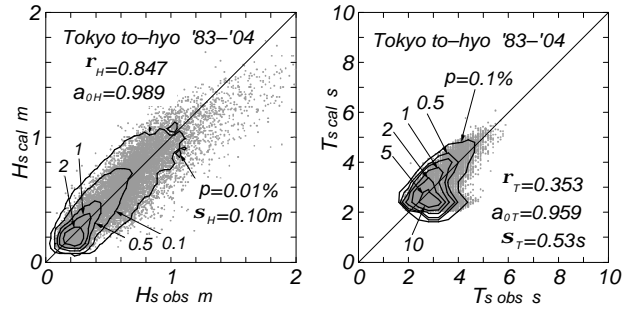


図-6 特別波高および周期に対する推算資料と観測資料の比較

ことに起因すると推測される。3つの波高誤差指標 r_H , a_{0H} , s_H は、推算資料と観測資料の相関がいずれの地点でも平均的に高いが、第2海堡ではやや低いことを示唆する。周期に関して、湾外のアシカ島や浜金谷と湾内の東京灯標で推算資料と観測資料が比較的よく符合し、湾内外境目の第2海堡でやや乖離を生じる。第2海堡では、N寄りの湾内波浪とS寄りの湾外波浪が入射することによって生じる複雑な波浪状況を再現することは容易でない。

(3) 月別波候

波浪推算資料は1979~2004年の26年間、この間の波浪観測資料は最長で22年間 (1983~2004年、東京灯標) , 最短でも10年間 (1994~2003年、千葉観測塔) にわたり得られていることから、ここでは、長期にわたる波候特性の細部をみるために、個々の月における波候統計量について推算資料と観測資料の比較を行う。

図-8は東京灯標における推算資料と観測資料より得た月別波高・周期統計量 (H_{s10} , H_{s3} , H_{sm} , H_{ss} , T_{s3} , T_{sm}) の経月変化を表す。また下側には、推算資料と観測資料より得た各月別波高統計量間の相関図を示す。この場合の誤差指標として、たとえば1/10最大平均波高 H_{s10} に対して相関係数 $r(H_{s10})$ と原点を通る回帰直線の勾配値 $a_0(H_{s10})$ を与える。各波高統計量は夏に大きく、冬に小さい値をとりながら毎年ほぼ規則的に変化すが、その変動幅は1990年代前半で小さく、1990年代後半以降で大きいし、1980年代では両者の中間的な値を示す。波高統計量に関して、推算資料による値は観測資料によるものとよく符合しており、観測資料における年代別の波高統計量の変動が推算資料においても見出される。

一方、周期については、推算資料に基づく1/3最大平均周期 T_{s3} は0.6~1.1 sの年較差 (年別の各月最大値と最小値の差) を伴いながら規則的な経年変化を示すのに対して、観測資料では年較差が推算資料によるものの1/2程度と小さい。月平均周期 T_{sm} の各資料間にも同様の傾向がみられるうえに、冬季では推算資料は観測資料より

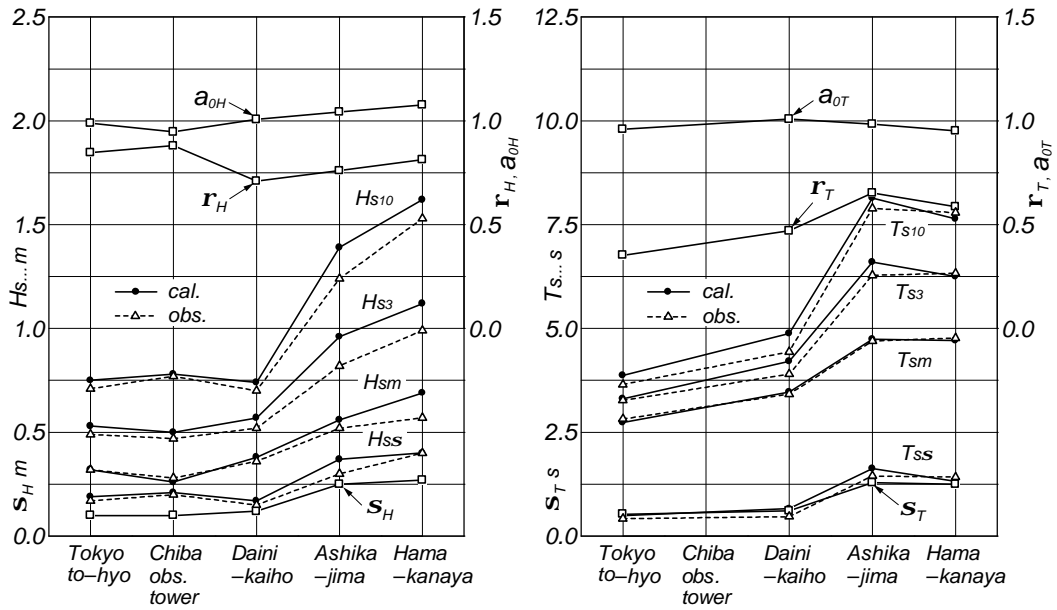


図-7 累年波候統計量および誤差統計量

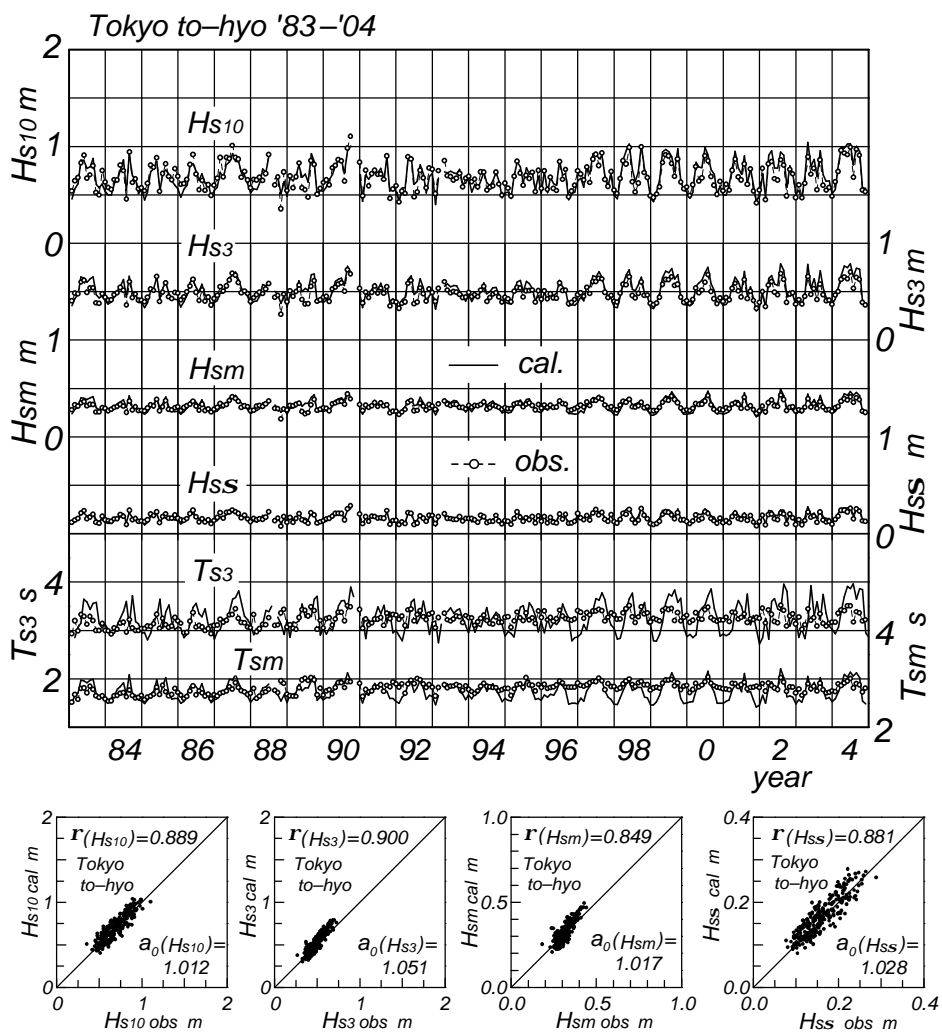


図-8 月別波高・周期統計量の比較

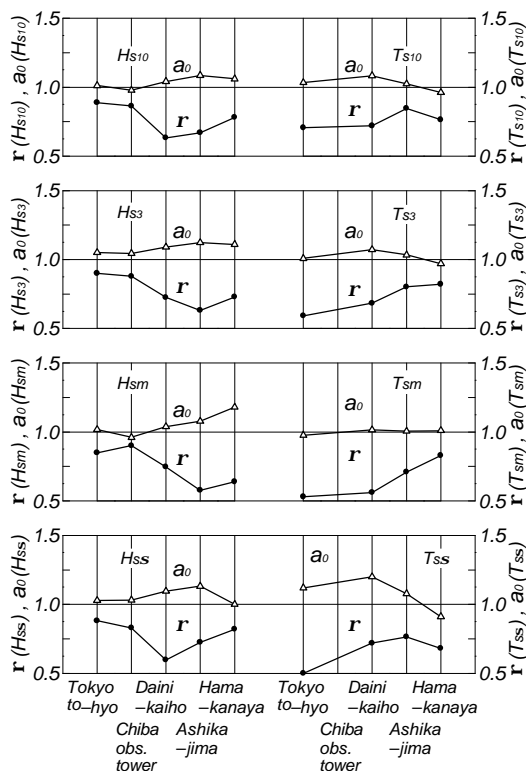


図-9 月別波候統計量の誤差指標

かなり小さい値を与える。これは、波高が小さいときにこれに対応して周期が必ずしも小さい値をとらないという観測資料の特性を反映する。

図-9は5地点における月別波候誤差指標を図示したものである。まず波高に関して、湾内の東京灯標や千葉観測塔で相関係数および勾配値がともに1に近い値をとる。湾内外境目の第2海堡や湾外のアシカ島と浜金谷では相関係数が小さく、勾配値は1より大きい。つまり、湾内地点では、波高に対する推算精度が高いのに対して、湾外地点では推算値が大きめの値を与え、精度もやや低い。ついで、周期に関して勾配値はいずれも1前後の値をとる。相関係数は湾内地点で小さいのに対して、湾外地点ではより1に近い値を示す。これは湾内発生波の大部分を占める低波高・短周期の波浪の場合の観測周期に対する変動が大きいこと、あるいは周期の測定精度に問題があることに起因すると考えられる。

5. 結語

本研究で得た知見はつぎのように要約される。

多くの沿岸地点と海上地点で長期の風観測資料が得られる東京湾では、これらの資料の空間補間に基づいて台風や低気圧などの個々の気象擾乱時の海上風分布のみならず季節別平均風（風候）の空間分布を適切に推定できる。

湾内発生波が卓越する東京灯標や千葉観測塔では、観測風を用いて推定した海上風分布を入力条件とする高地形解像度波浪推算によって、波高の経時変化や年代で増減する経年変動を含む波高統計量の経月・経年変化を適切に追跡できる。

湾内で取得された周期観測資料は風および波高観測資料と必ずしも連動して変化しない傾向にあることから、推算資料との比較にあたっては周期観測資料の注意深い品質管理、すなわち取得選択が必要である。

局所風による波浪のみならず外洋から伝播する波浪の影響を強く受ける湾外地点を対象とする波浪推算では、推算精度の改善のために、局所風の適正な推定に加えて外洋海上風の時間解像度の向上が必要である。

謝辞：本研究の実施にあたり膨大な量の風・波浪観測資料を提供戴いた関係各機関（東京都港湾局、千葉県千葉港湾事務所、京葉シーバース（株）、独立行政法人港湾空港技術研究所海象情報研究室長 永井紀彦博士（現海洋・水工部長）、東京湾横断道路株式会社、独立行政法人防災科学技術研究所、日本海洋データセンター（JODC）、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室 加藤史訓主任研究官）ならびに資料収集にきわめて好意的かつ積極的な支援を戴いた国際気象海洋（株）取締役社長 永吉毅至氏に深謝致します。

参考文献

- 1) 橋本典明・杉本 彰・川口浩二・宇都宮好博：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.201-205，2002.
- 2) 橋本典明・川口浩二・池上正春・鈴木勝之：東京湾におけるWAMの波浪推算特性に関する検討，海洋開発論文集，第20巻，pp.845-850，2004.
- 3) 川口浩二・橋本典明・杉本 彰：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，海岸工学論文集，第50巻，pp.191-195，2003.
- 4) 塩野清治・弘海原 清・升本真二：パソコンで不規則に分布するデータを格子点データに変換してコンターマップを作成する方法（1）-加重一次補間法，情報地質（10），pp.65-78，1985.
- 5) 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博：一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性，土木学会論文集，第381号/7，pp.151-160，1987.
- 6) 畑田佳男・山口正隆・大福 学・高橋秀典：表面風再解析資料を用いた波浪の長期推算システムの適用性の向上，海岸工学論文集，第52巻，pp.141-145，2005.
- 7) Toba, Y.: Local balance in the air-sea boundary processes I On the growth process of wind waves, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol.28, pp.109-121, 1972.

（2007.9.30受付）