

# 内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築 —瀬戸内海の場合—

A Long-Term Wave Hindcast System in Quasi-Closed Sea Areas —Seto Inland Sea—

山口正隆<sup>1</sup>・日野幹雄<sup>2</sup>・大福 学<sup>3</sup>・畑田佳男<sup>4</sup>・野中浩一<sup>5</sup>

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

This paper presents a wave hindcast system for estimating climatic characteristics of waves over 23 years at an arbitrary point in a quasi-closed basin that is partly connected to an open ocean such as the Seto Inland Sea. A data set of hourly over-sea wind distribution is made using measured wind data acquired at many coastal and sea stations. A wave computation at each of the wave measurement stations is conducted using a backward ray tracing wave model on a grid with high spatial resolution. Comparison between calculated and measured wave data shows that the system yields a reasonable estimate of long-term wave characteristics and that the present system has a higher ability in a long-term wave estimation than previous systems.

## 1. 緒 言

瀬戸内海における長期の波浪に関して、橋本ら (2006) は地域気象モデルによる推算風を入力条件とする WAM を用いた計算を、畑田ら (2004) は ECMWF による表面風解析値を入力条件とする 1 点浅海モデルを用いた計算を行い、それぞれ観測資料との比較からその妥当性を検証している。しかし、前者では精度が比較的高いものの、対象期間が 1 年飛びの 3 年と短く、後者では 20 年と長いものの、精度がやや不足している。

そこで、本研究では内湾・内海における高精度な長期波浪推算システムの構築という観点から、瀬戸内海の沿岸部や海上部の多数地点で取得された風観測資料に対する空間補間によって作成した海上風分布を入力条件とした、高地形解像度計算に容易に対応できる 1 点浅海モデルによる長期波浪推算を内海発生波が卓越する 4 波浪観測地点で実施し、時系列や波候について観測資料との比較を行いその精度を明らかにする。

## 2. 波浪の長期波浪推算システム

### (1) 海上風分布資料

ここでは、入力条件とする海上風分布資料を 2 種類用意する。1 つは北西太平洋での ECMWF 表面風再解析・解析資料 (ECMWF 風資料) に楕円型気圧分布の仮定のもとで得た台風モデル風を組込んだ 1 時間間隔の海上風分布資料 (畑田ら, 2005) である。他の 1 つは図-1 に示すように、①瀬戸内海の沿岸部と海上部に位置する

最大 57 地点における風観測資料、②海上部に設けた 17 仮想地点における風補間資料、③領域境界 7 地点の ECMWF 風資料に、加重 1 次補間法 (塩野ら, 1985) を 2 段階で適用して得た格子間隔 2 km の瀬戸内海における海上風分布の 1 時間間隔資料である。対象期間は広範に分布する多数地点の風観測資料が整備できる 1983 年 1 月 1 日～2005 年 12 月 31 日の 23 年とする。

風観測資料の時間間隔は主として 1 時間である。2 時間間隔の資料の場合には、風速を 2 時刻の値の平均値により、風向を 2 時刻の各風速成分の平均値に対する逆正接関数演算により、1 時間間隔の資料とする。欠測を含む風観測資料は、まず 3 時点までの欠測部に対して前後の風資料を用いた線形補間による補充、ついで近接地点の風観測資料との相関を考慮した補充や近接地点の風観測資料との合成、さらに ECMWF 風資料の補充を通じて、できるだけ長期間の完全資料としたのち、1/7 乗則を適用して 10 m 高度風速に変換し、観測状況や累年平均風速を考慮して地点ごとに決めた係数 (1.0～1.35) を乗じて 10 m 高度海上風速資料とする。風向に対する高度補正や海上風補正は行わない。

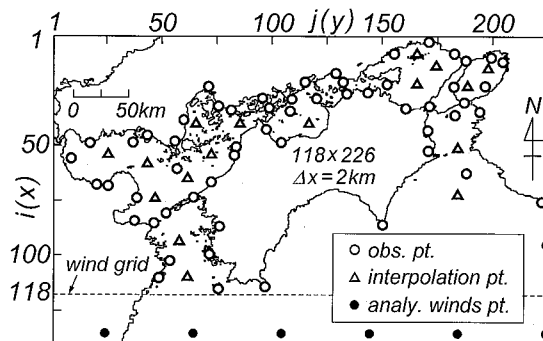


図-1 風資料入力地点および風補間地点の位置

1 正会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科教授  
2 正会員 工修 (株)テクノシステム  
3 愛媛大学工学部技術専門職員  
4 正会員 博(工) 愛媛大学大学院理工学研究科講師  
5 正会員 博(工) 愛媛大学工学部契約職員

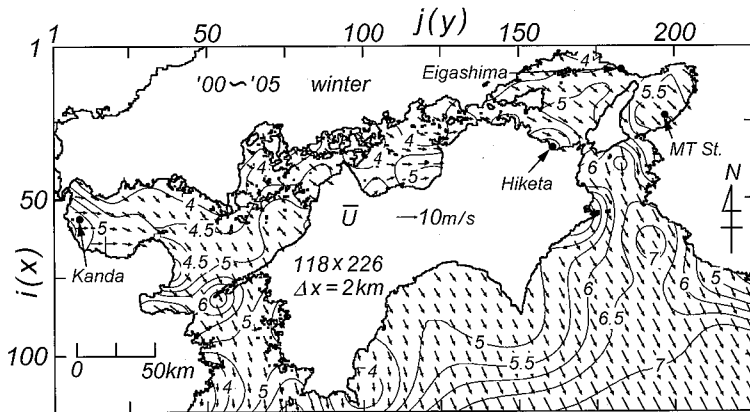


図-2 冬季における平均風速・風向分布

風観測資料の期間は30地点で1983～2005年の23年とするほか、残りの最大27地点では個々に23年より短い。使用する風観測資料の地点数は年とともにおおむね増加することから、得られた海上風分布資料は非等質性の問題を伴う可能性があるけれども、ここではこれを無視する。仮想地点の導入は風が陸上部より海上部で強く吹送する特性を再現するためであり、また境界上代表地点におけるECMWF風資料の導入は内海部の風と外洋の風を滑らかに接続するためである。

海上風分布の算出では、まず23年間1時間ごとの瀬戸内海における観測風資料と境界上のECMWF風資料に加重1次補間法を適用して得た17仮想地点それぞれの風速・風向資料に、各仮想地点とその近くの観測地点における累年平均風速を考慮して決めた海上部での増幅係数(1～1.25)を乗じて仮想地点における海上風資料(風向は同じ)を作成する。この場合、風速は風速資料に対する加重1次補間(スカラー補間)により、風向は各風速成分資料に対する2回の加重1次補間(ベクトル補間)により求める。ついで、最大57地点の観測風資料、17地点の補間風資料および7地点のECMWF風資料の23年間1時間別値に加重1次補間法を再度適用して、格子間隔2kmの瀬戸内海風格子網における海上風分布を23年間1時間ごとに作成する。

図-2は2000～2005年の冬季における平均風速・風向の空間分布を示す。冬季には、風向は全体としてNW寄りであり、風速は海峡部での収束を伴いながら外洋に向けて50%以上増大する。こうした特徴は春季と秋季にもみられる。なお、夏季には、風向はS寄りの方向をとり、風速も1～2m/s小さい。

## (2) 波浪推算の方法

波浪推算は、図-3に示す格子間隔5kmの北西太平洋に格子間隔0.5kmの瀬戸内海を組込んだ2段階高地形解像度格子網を用いて1点浅海モデル(山口ら, 1987)

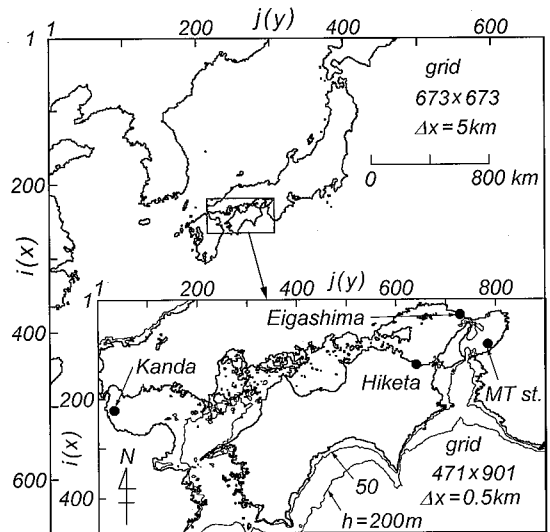


図-3 波浪推算用2段階格子網と波浪推算地点

により4波浪観測地点で実施する。周波数の個数は $f=0.10 \sim 1.0$  Hzを不等分割した23, 方向の個数は $0 \sim 360^\circ$ を $10^\circ$ で等分割した37, 海上風の入力時間間隔は1時間, 波浪推算の時間間隔は10分, 推算期間は1983～2005年の23年である。海上風は1時間の間不変とする。

波浪推算(観測)地点は周防灘の荻田(水深9m)、播磨灘で対峙する江井ヶ島(水深10.5m)と引田(水深11.5m)、および大阪湾内のMT局(水深20.8m)である。いずれも内海発生波が卓越することから、その場の海上風の推定精度が波浪の推算精度に直接反映される。

## (3) 波浪観測資料

全般的に言えば、内海・内湾における波浪観測資料の質は低波高や低波高時周期に対して低く、とくに周期は風や波高の経時変化に必ずしも追従しないことが多い。

そこで、ここでは、(有義)波高  $H_s$  については観測資料全部を比較対象としたが、(有義波)周期  $T_s$  については  $T_s \leq 10(H_s)^{1/2}$  の条件を満たす観測資料に限定する。

#### (4) 資料解析法

波高・周期の推算資料は相当する観測資料の期間について資料全期間(累年)での時系列や相關図による比較、累月および月別の各種波候統計量(波高資料の上位 1/10, 1/3 の平均値  $H_{s10}$ ,  $H_{s3}$ , および全体の平均値  $\bar{H}_s$  と標準偏差  $H_{s\sigma}$ , 波高 0.5 m 以上の高波出現率  $p_H$ , 同様に周期資料も高波出現率を除いて  $T_{s10}$ ,  $T_{s3}$ ,  $\bar{T}_s$ ,  $T_{s\sigma}$ )の比較を行う。特別資料に対する誤差指標として、相関係数( $\rho_H$ ,  $\rho_T$ ), 原点を通る相關直線の勾配値( $a_{0H}$ ,  $a_{0T}$ )および2乗平均誤差( $\sigma_H$ ,  $\sigma_T$ ), 波候統計量に対する誤差指標として、相関係数および原点を通る相關直線の勾配値, たとえば月別上位 1/3 平均波高  $H_{s3}$  について  $\rho(H_{s3})$  と  $a_0(H_{s3})$  を用いる。

### 3. 波浪推算資料の検討

#### (1) 波浪時系列の比較

図-4 は荻田および引田における波浪時系列の比較を示す。推算資料は2004年8月30日の台風0416号および9月7日の台風0418号(荻田)や2004年10月20日の台風0423号(引田)の通過に伴う急激な変化を含めて観測資料によく追従する。

図-5 は特別波高に対する推算資料と観測資料の対応を相対出現率  $p$  の等値線として4地点で示す。資料期間は荻田と江井ヶ島の13年(1992～2004年), 引田の4

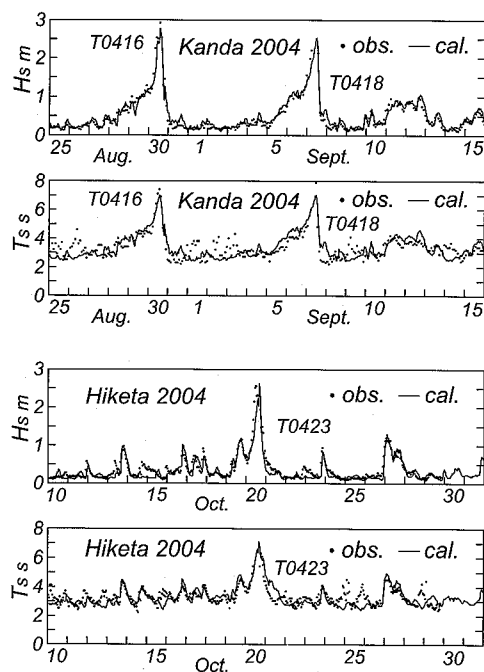


図-4 波高・周期時系列の比較

年(2001～2004年)およびMT局の23年(1983～2005年)である。それぞれの観測地点で一致の度合は異なるけれども、等値線は多くの資料が45°直線のまわりに集中することを表すことから、推算値と観測値は比較的良好に一致すると言える。とくに、海上風観測資料が海上風分布資料の作成に用いられている荻田とMT局では、一致度が高いのに対して、沿岸風資料が用いられている江井ヶ島や引田では、一致度がやや低い。図-6 は特別周期に対する同様の等値線図を荻田と江井ヶ島について示す。斜め上方に細くなる等値線の形状は、資料値が長い周期の場合に45°直線の周りに集まるのに対して、短い周期の場合には広範に分布することを表す。これは低波高短周期に対する不十分な測定精度に起因すると思われる。

表-1 は累年波高・周期誤差指標の一覧を示す。表には荻田(2004)および橋本(2006)の数値も与えられる。まず波高について、相関係数  $\rho_H$ , 勾配値  $a_{0H}$ , 2乗平均誤差  $\sigma_H$  のいずれの指標も、荻田およびMT局では推算資料の精度がかなり高く、また引田と江井ヶ島ではこれら2地点に比べてやや低いことを示唆する。周期

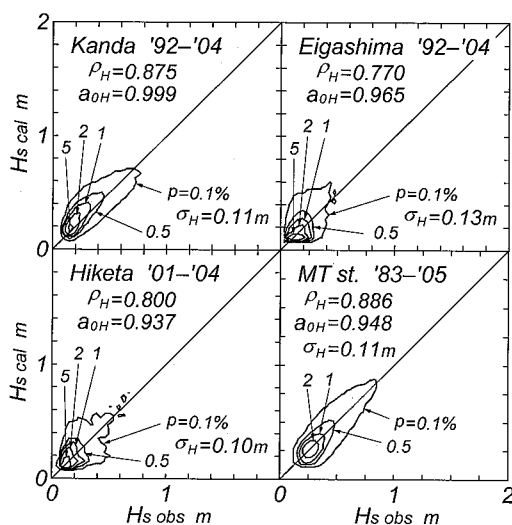


図-5 特別波高に対する比較

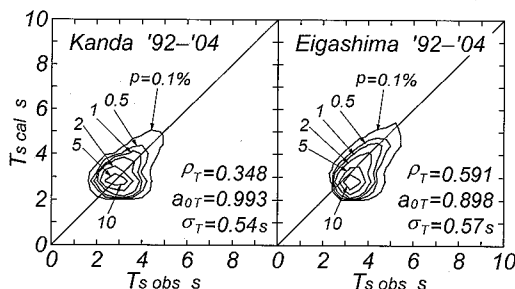


図-6 特別周期に対する比較

表-1 時別波高・周期資料に対する累年誤差指標の一覧

| 地 点  | $\rho_H$ | $\alpha_{0H}$ | $\sigma_H$ | $\rho_T$ | $\alpha_{0T}$ | $\sigma_T$ |
|------|----------|---------------|------------|----------|---------------|------------|
| 苅 田  | 0.88     | 1.00          | 0.11       | 0.35     | 0.99          | 0.54       |
| ＊    | 0.64     | 0.88          | 0.18       | 0.28     | 0.98          | 0.7        |
| ＊＊   | 0.82     | 1.17          | 0.14       | 0.32     | 0.95          | 0.71       |
| 江井ヶ島 | 0.77     | 0.97          | 0.13       | 0.59     | 0.90          | 0.57       |
| ＊    | 0.57     | 0.87          | 0.18       | 0.43     | 0.84          | 0.8        |
| ＊＊   | 0.76     | 1.26          | 0.16       | 0.17     | 0.71          | 1.44       |
| 引 田  | 0.80     | 0.94          | 0.10       | 0.37     | 0.97          | 0.51       |
| MT   | 0.89     | 0.95          | 0.11       | 0.12     | 0.95          | 0.66       |

 $\sigma_H$ : m  $\sigma_T$ : s

\*: 畑田ら (2004) \*\*: 橋本ら (2006)

については、 $T_s > 10(H_s)^{1/2}$  の条件で不適切な資料を除去しているものの、相関係数  $\rho_T$  の値は全体的に 1 よりかなり小さいことから、推算資料の精度はあまり高いと言えない。しかし、とくに低波高時における観測周期の精度に問題があるので、推算周期の精度の良否を断定的に論ずるのは早計であろう。また、苅田および江井ヶ島において畑田ら(2004)の結果と比べると、相関係数および勾配値の 1 への接近と 2 乗平均誤差の減少という本研究における各誤差指標の挙動はいずれも観測資料に基づく海上風分布資料の使用に伴う波浪推算精度のかなりの程度の向上を示唆する。この場合、観測資料の期間は異なるが、比較に使用する周期資料の選択方法は同一である。また、橋本ら(2006)の結果と比べても、誤差指標は波高に関して、本研究の結果の精度が高いことを表す。一方、周期について本研究では資料の選択を行っているので、橋本ら(2006)の結果との直接的な比較は行えない。

## (2) 波候統計量の比較

表-2 は 4 観測地点における波高・周期に関する累年波候統計量の比較一覧である。各地点の推算資料と観測資料による波候統計量は江井ヶ島の周期を除いて全体としてよく符合する。江井ヶ島の観測資料はブイによって取得されていることから、ブイの応答性能の制約のため、短周期の波浪が長めに評価されており、その結果、平均周期に関して推算資料が観測資料より小さい値を与えるが、長い周期資料ほど両者の対応が向上する。

図-7 は累月波高・周期統計量の比較を苅田について示す。内海・内湾では小波高の測定精度が低いので、大きい波高や長い周期を代表する統計量である上位 1/3 の

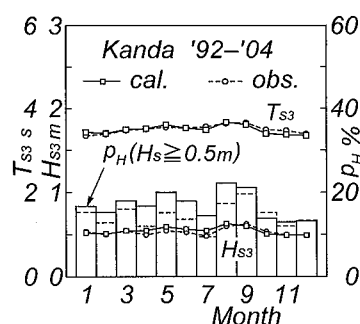


図-7 累月波高・周期統計量の比較

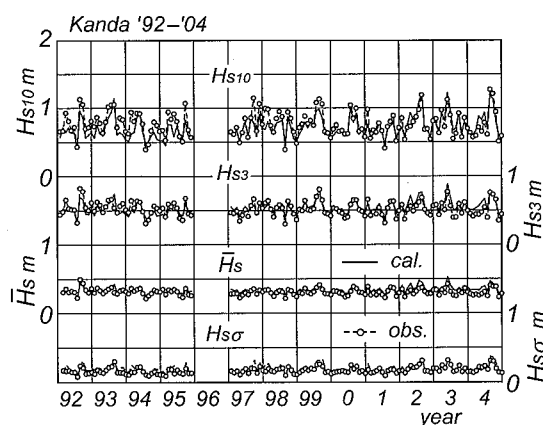


図-8 月別波高統計量の経月変化の比較

各資料の平均値  $H_{s3}$  と  $T_{s3}$  および高波出現率  $p_H$  を用いている。推算資料と観測資料による結果の対応は良好であるが、4～7月で推算波高が観測波高よりやや大きい。

つぎに推算資料と観測資料に基づく月別波高統計量  $H_{s10}$ ,  $H_{s3}$ ,  $\bar{H}_s$ ,  $H_{s\sigma}$  の経月変化を苅田について示したのが図-8である。測得率は1996年の欠測や1994年の0.898, 1995年の0.844と1997年の0.866を除いて0.948より大きく、とくに1998年以降0.987～1の間にある。推算資料は波高統計量の月別変化に対して観測資料によく追従するけれども、高波高部を代表する  $H_{s10}$  に関して推算資料はやや低い値を与えるようである。月別波高統計量に対する推算資料と観測資料の対応をより明確にするために、両者の  $H_{s3}$  を散布図として4地点で示したのが図-9である。多少のばらつきを伴う

表-2 累年波高・周期統計量の比較一覧

| 地 点   | $\bar{H}_s$ m |      | $H_{s0}$ m |      | $H_{s3}$ m |      | $H_{s10}$ m |      | $p_H$ (%) |      | $\bar{T}_s$ s |      | $T_{s0}$ s |      | $T_{s3}$ s |      | $T_{s10}$ s |      |
|-------|---------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|-----------|------|---------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
|       | cal.          | obs. | cal.       | obs. | cal.       | obs. | cal.        | obs. | cal.      | obs. | cal.          | obs. | cal.       | obs. | cal.       | obs. | cal.        | obs. |
| 苅 田   | 0.34          | 0.31 | 0.18       | 0.21 | 0.55       | 0.53 | 0.75        | 0.80 | 16.9      | 14.4 | 2.99          | 2.96 | 0.44       | 0.50 | 3.49       | 3.51 | 3.95        | 3.94 |
| 江井ヶ島  | 0.24          | 0.22 | 0.19       | 0.18 | 0.44       | 0.39 | 0.71        | 0.66 | 10.0      | 7.0  | 3.08          | 3.42 | 0.55       | 0.46 | 3.72       | 3.93 | 4.31        | 4.42 |
| 引 田   | 0.22          | 0.22 | 0.16       | 0.16 | 0.38       | 0.38 | 0.61        | 0.61 | 6.7       | 6.7  | 3.04          | 3.11 | 0.47       | 0.42 | 3.58       | 3.57 | 4.09        | 3.89 |
| M T 局 | 0.40          | 0.41 | 0.22       | 0.23 | 0.65       | 0.65 | 0.92        | 0.97 | 24.0      | 22.5 | 3.15          | 3.25 | 0.52       | 0.48 | 3.75       | 3.76 | 4.32        | 4.24 |

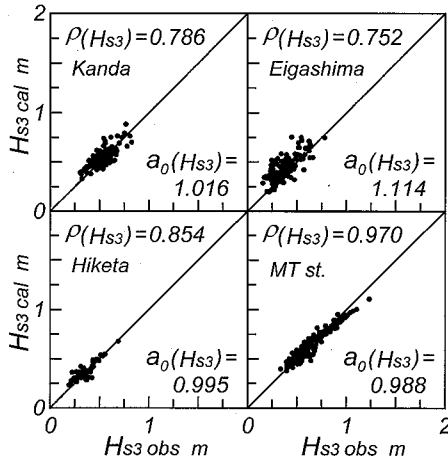


図-9 月別波高統計量資料の散佈図

表-3 月別波高・周期統計量の誤差指標の一覧

|               | 荻田     |       | 江井ヶ島   |       | 引田     |       | MT局    |       |
|---------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|               | $\rho$ | $a_0$ | $\rho$ | $a_0$ | $\rho$ | $a_0$ | $\rho$ | $a_0$ |
| $H_{s10}$     | 0.83   | 0.93  | 0.75   | 1.03  | 0.89   | 1.00  | 0.96   | 0.95  |
| $H_{s3}$      | 0.79   | 1.02  | 0.75   | 1.11  | 0.85   | 1.00  | 0.97   | 0.99  |
| $\bar{H}_s$   | 0.76   | 1.10  | 0.56   | 1.05  | 0.86   | 0.99  | 0.94   | 0.98  |
| $H_{s\sigma}$ | 0.83   | 0.86  | 0.80   | 1.03  | 0.90   | 1.01  | 0.95   | 0.95  |
| $p_H$         | 0.72   | 1.10  | 0.84   | 1.27  | 0.90   | 0.96  | 0.96   | 1.03  |
| $T_{s10}$     | 0.78   | 0.93  | 0.90   | 0.97  | 0.77   | 1.04  | -0.03  | 0.99  |
| $T_{s3}$      | 0.79   | 1.02  | 0.93   | 0.95  | 0.74   | 1.00  | -0.13  | 0.99  |
| $T_s$         | 0.55   | 1.01  | 0.93   | 0.90  | 0.67   | 0.98  | -0.32  | 0.97  |
| $T_{s\sigma}$ | 0.63   | 0.88  | 0.84   | 1.25  | 0.72   | 1.07  | 0.13   | 1.03  |

ものの、それぞれの地点で推算資料と観測資料はよく符合する。

表-3は各種月別波高・周期統計量に対する相関係数と勾配値の一覧を与える。この表によると、相関係数は江井ヶ島における $\bar{H}_s$ や荻田における $T_s$ のように、資料値の変動範囲が小さい場合に小さい値をとる傾向にある。またMT局では、周期に関する相関係数は小さい値しかとらない。これは推算周期資料と観測周期資料が冬と夏で逆の挙動を示すためであり、その理由は今後の検討課題である。このように地点ごと、また月別波高・周期統計量の種類ごとに相関係数や勾配値がある程度変化するけれども、いずれの地点でも高波高部や長周期部を代表する各資料の上位1/3や1/10の平均値に関して比較的高い相関と1に近い勾配値を与えることから、少なくとも上位資料に対する推算精度は良好であるとみなされる。

図-10は累年平均値で無次元化した年別上位1/3平均波高 $\bar{H}_{s3}$ の経年変化をMT局における推算資料と観測資料について示す。MT局では23年以上にわたり、風・波浪観測資料が得られており、しかも1983年以降

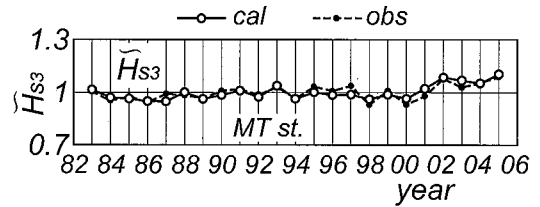


図-10 年別波高統計量の経年変化の比較

でもその測得率は最低値0.936を含む4年相当分を除いて0.972～0.993と非常に高い。図から明かなように、推算資料と観測資料はよく符合する。因みに、これらの時系列にあてはめた直線の勾配値はそれぞれ(0.40, 0.31)%であり、 $t$ 検定における95%の信頼係数やトレンド示数の値もそれぞれかなり近い値をとることから、 $t$ 検定やトレンド示数による傾向変動に対する判別結果は一致し、MT局における波高資料には統計的に有意な増加傾向があると判定される。ただし、MT局は1978年の設置以降3回にわたって最大約4kmその位置を変えており、しかも空港外郭施設の状況も変化しているため、風・波浪観測資料の等質性に多少の問題をもつ可能性もある。

#### 4. 結 語

本研究では種々の検討から、①得られた海上風分布は瀬戸内海における風況を再現すること、②本システムは、内海発生波が卓越する複数地点の長期にわたる波浪時系列や波候特性を高い精度でかつ効率的に再現し、しかもその精度は畑田ら(2004)や橋本ら(2006)による既往の結果を上まわる、ことを明らかにした。

最後に、膨大な風およびNOWPHAS資料を含む波浪観測資料を提供戴いた関係各機関に誠意を表する。

#### 参 考 文 献

- 塩野清治・弘海原 清・升本真二(1985): 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.
- 橋本典明・児玉充由・三谷正人・友田信明・松本英雄・松藤絵里子(2006): 海象情報数値データベースを利用した瀬戸内海の波浪特性解析, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 121-126.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一・白水英治(2004): 波浪の長期推算システムの瀬戸内海沿岸における適用性の検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 175-180.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・高橋秀典(2005): 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.
- 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博(1987): 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/II-7, pp. 151-160.