

台風時波浪および高潮のリアルタイム予測システムの適用性

山口正隆*・畑田佳男**・花山格章***・曾我部健一****

1. 緒 言

台風に伴う高波と高潮を台風来襲の24～12時間前に現地でパソコン程度の計算機の使用により簡便かつ精度よくリアルタイム予測できれば、避難警報等を含む台風時の沿岸防災対策に有用な情報を提供できよう。しかし、気象庁による波浪予測は面的に行われるから、特定地点の波浪時系列の予測値は明らかでないし、逆に、高潮予報は回帰式に基づき特定地点についてのみ行われるから、任意地点の高潮時系列の予測値は得られない。

最近、山口ら（1989, 1995）は台風モデル法による海上風推算モデルと深海エネルギー平衡方程式に基づく1点深海波浪推算モデル（1点深海モデル）を組み合わせた台風時波浪予測システムを、また、小西（1994）は台風モデル法による海上風推算モデルと高潮の数値モデルを組み合わせた台風時高潮予報システムを開発しているが、台風勢力（中心気圧、台風半径）の予測法や波浪・高潮の予報精度に改良の余地を残している。

そこで、本研究では、台風モデル法に基づく海上風および気圧の予測において、台風中心位置の予報値のほか台風勢力の予測値を考慮した台風時波浪および高潮のパソコン用リアルタイム予測システムを作成し、台風9119号および台風9313号を対象とした波浪および高潮の模擬的予測結果と観測結果の比較から、本システムの適用性を検討する。

2. 波浪および高潮の予測システム

2.1 海上風推算モデル

海上風の計算は、台風の中心位置、中心気圧、台風半径で表される台風属性を入力データとする台風モデル法による。これは、台風内の気圧分布に対して Myers 式を仮定して求めた中心対称傾度風と、台風の移動に伴う場の風にそれぞれ変換係数（定数 0.6）を乗じたのち、両者の和から 10 m 高度における海上風速 U_{10} および風向 θ_w を推定する方法である。本研究では、傾度風に乗ずる変

換係数 $G(x)$ は、準 supergradient wind の影響を考慮するため、定数とせず、藤井ら（1986）の式における係数を修正した次式による。

$$G(x) = G(\infty) + \{G(x_p) - G(\infty)\} \left(\frac{x}{x_p} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[(1-1/k) \{1 - (x/x_p)^k\} \right]$$

$$G(\infty) = 0.6, G(x_p) = 0.9, x_p = 0.5, k = 2.5$$

..... (1)

ここに、 $x = r/r_0$ 、 r ：台風中心からの距離、 r_0 ：台風半径、である。式（1）は台風 7705 号や 7709 号時の観測風速の解析に基づいて導かれた経験式であるが、原式のままで台風中心付近の風速が過大評価されるので、変換係数が原式より小さくなるように係数を修正している。変換係数は、台風中心から離れた地点では、従来多用されてきた $G(\infty) = 0.6$ に漸近するが、台風中心付近では、これより大きい値をとる。また、気圧分布の算定は半径方向への指数型関数を仮定する上述の Myers 式による。

中心気圧降下量 ΔP および台風半径 r_0 の予測は、過去 41 年間（1951 年～1991 年）の間に図-1 に示す領域を通過し、中心気圧が 980 hPa 以下に発達した 320 台風の 6 時間ごとの ΔP (hPa) および r_0 (km) データに対する相関解析から得られた次の回帰式による。

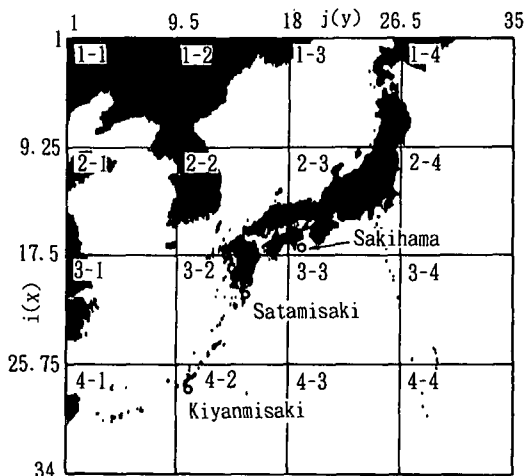


図-1 ΔP および r_0 に対する回帰予測式の作成領域

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科
 ** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科
 *** 正会員 工修 五洋建設株式会社
 **** 正会員 株式会社芙蓉調査設計事務所

表一 領域別回帰係数

region		$a_p(W-E)$		$b_p(W-E)$	
		2	3	2	3
N	2	1.59	3.89	0.83	0.72
I	3	0.82	2.08	0.93	0.92
S	4	3.27	2.92	0.93	0.93

region		$a_r(W-E)$		$b_r(W-E)$		$c_r(W-E)$	
		2	3	2	3	2	3
N	2	26.5	51.4	1.01	0.88	-0.26	-0.54
I	3	29.6	24.5	0.90	0.94	-0.32	-0.29
S	4	10.3	9.4	0.90	0.94	-0.02	-0.04

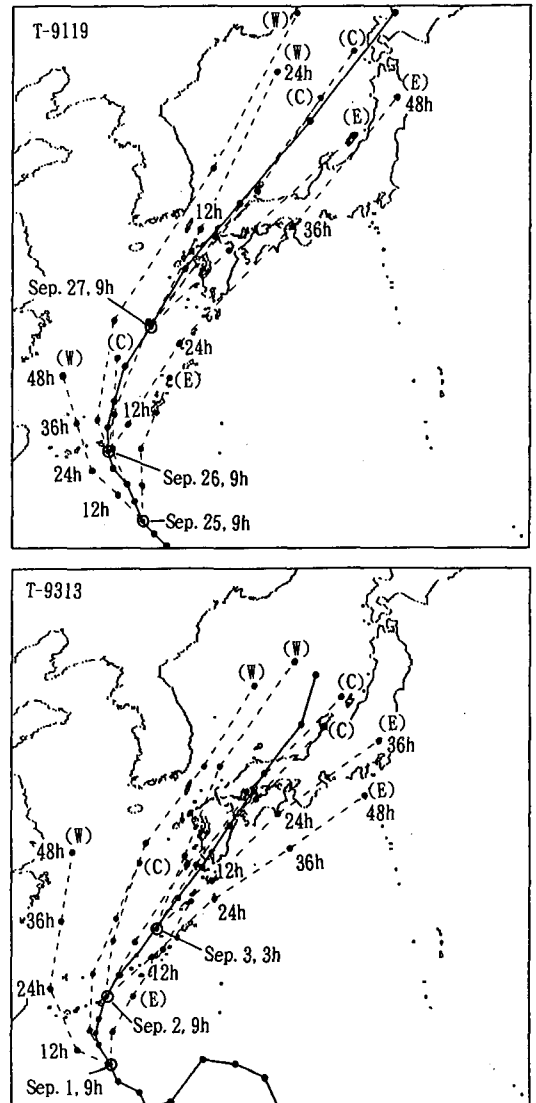
$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{i+1} &= a_p + b_p \Delta P_i \\ r_{0i+1} &= a_r + b_r r_{0i} + c_r \Delta P_{i+1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、添字 i は 6 時間間隔の時点を表す。台風半径の予測式は、1 時刻前の台風半径と現時点の気圧降下量の相関を考慮している。各回帰係数 a_p, b_p, a_r, b_r および c_r は、台風勢力の変化の地域特性を考慮するため、対象領域を 16 分割した小領域ごとに求められている。本研究で用いた 6 小領域の係数を表一に示す。これによると、係数 b_p は 1 以下、 c_r は負値をとるから、多くの場合、式 (2) は時間の経過とともに、中心気圧降下量が減少し、台風半径が増大する結果を与える。

波浪および高潮のいずれについても、予測開始時点まで、台風属性の観測値を入力データとして追算を行ったのち、気象庁が逐次発表する台風中心位置のほか中心気圧および台風半径の回帰予測値を入力データとして最長 48 時間予測を行う。以後、気象庁により台風中心位置の予報値が発表される時刻を適切に選択してその時点までの追算と予測を繰り返す。

台風の予想経路は、気象庁予報部から 12 時間(台風接近時では 3 時間)ごとに発表される 12, 24 および 48 時間後の台風進路予報円に関する情報に基づいて、予報円中心(36 時間後の予想位置は発表されないため、24 時間後と 48 時間後の位置を補間した値)と、最も東側および西側の予想経路と予報円の接する東西 2 地点をそれぞれ結んだ 3 種類 (C, E, W) とし、中心気圧降下量および台風半径は式 (2) から 6 時間ごとに回帰予測する。予報円上 2 地点を通る経路の追加は、台風中心位置の予測誤差に伴う波浪・高潮の変動幅を考慮するためである。

図一は波浪および高潮の模擬予測を行う台風 9119 号および 9313 号の実際の経路および予想経路を示したものである。台風 9119 号は石垣島から東シナ海を通り、九州北部を北東に日本海へ抜けた近年まれにみる巨大台風であり、台風に伴う強風、波浪、高潮によって九州から瀬戸内海沿岸のみならず日本全国で甚大な被害が生じた。また、台風 9313 号は沖縄西方海上から九州南部、四



図一 予想台風経路

国西部を北東に進行した巨大台風である。本台風は九州南部上陸時の中心気圧が 930 hPa、上陸後衰えたものの、豊後水道付近でも 950 hPa という強い勢力を保ったので、西日本一帯に猛烈な強風をもたらしたが、台風 9119 号時ほどの被害は生じていない。

2.2 波浪推算モデル

波浪推算には、山口ら (1989) の 1 点深海モデルを使用する。本モデルは、深海におけるエネルギー平衡方程式に基づいて、波浪推算点に集中する波向線上の格子点で成分波の伝播・発達・減衰計算を行うことにより、波浪推算点における方向スペクトルと、周波数スペクトルおよび有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、平均波向 $\bar{\theta}$ の経時変化を算出する。碎波に伴うエネルギー減衰の評価に

用いる平衡方向スペクトルは Pierson-Moskowitz スペクトルと $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数の積で表されるが、波浪推算点では、浅海性砕波の影響を近似的に考慮するため、これに $\tanh^2 kh$ (k : 波数, h : 水深) を乗じた式を用いる。

2.3 高潮の数値モデル

高潮の基礎方程式は、水深方向に積分された連続方程式および運動方程式である。連続方程式および運動方程式の数値解法には、時間に関して前進差分を、空間に関して中央差分を適用する差分法を用いる。開境界では境界条件として気圧低下に伴う静力学的な水位上昇量を与え、海面抵抗係数は通常用いられる $C_D=0.0026$ とする。海底摩擦力はもどり流れの影響を考慮した Reid 型表示式によることとし、係数を $C_f=0.0026$ におく。計算開始時には全領域で高潮偏差を 0 とする。

また、潮位を予測するため、標準港における潮汐定数 (M_2, K_1, O_1, S_2 分潮) を空間補間して得られる任意地点の潮汐定数を用いて、天文潮位を算出するとともに、これと高潮偏差に対する数値計算結果を加える。

3. 太平洋岸での波浪予測システムの適用性

3.1 計算条件

対象海域は格子間隔 5 km で分割した南北 3675 km, 東西 3360 km の北西太平洋 (図-1 より東に 640 km, 南に 1035 km 大きい) であり、波向線上の格子間隔は $\Delta s = 80$ km, 波向線上格子点における風および波浪の計算時間間隔は $\Delta t = 1$ h を用いる。とくに、海上風計算では 6 あるいは 12 時間ごとの台風属性を 1 時間ごとに 1 次補間して入力データとする。本論文で述べる波浪予測地点は、図-1 に位置を示す喜屋武岬、佐多岬および佐喜浜である。

周波数データは 0.04~0.90 Hz 間を不等分割した 20 個、方向データは各地点で外海に向って開いた方向範囲を 18 に等分割した 19 個である。波向線の計算は、陸地地形の細部を考慮するため、上述の 5 km 格子網に波浪推算点周辺海域を格子間隔 1 km あるいは 0.5 km で分割した小領域格子網を組み込んだ 2 段階格子網で行い、得られた対岸距離を格子間隔 80 km の整数倍に変換して波向線長とする。

3.2 波浪の予測結果

図-3 は図-2 に示す予想経路を用いた喜屋武岬 (9 月 25 日 10 時), 佐多岬 (9 月 26 日 10 時) および佐喜浜 (9 月 26 日 10 時) における台風 9119 号時の有義波高時系列の 48 時間予測結果である。予測開始時刻は, () 内に示すように, 30~36 時間後にそれぞれの予測地点に台風が最接近する時点である。中央の予想経路が実経路に最も近いことから, 佐多岬および喜屋武岬では, 中央経路の予測結果が観測値と最もよく対応する。とくに佐多岬の

中央経路に対するピーク値およびピーク時刻の予測精度は良好である。一方, 佐喜浜では, 台風経路からの距離が他の 2 地点より大きく, その結果, 海上風の推定精度が不足したため, 中央の予想経路の場合にも, 予測精度は十分とは云えない。

図-4 は 48 時間波高予測結果を台風 9313 号時の喜屋武岬 (9 月 1 日 10 時), 佐多岬 (9 月 2 日 10 時) および佐喜浜 (9 月 2 日 10 時) について示したものである。佐多岬の中央経路に対する予測結果は, ピーク値について

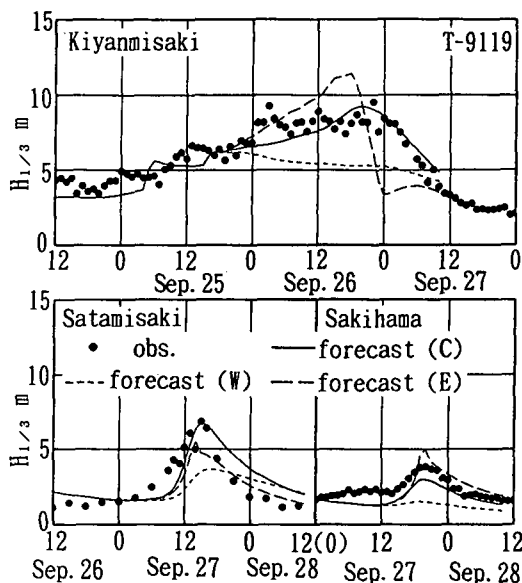


図-3 台風 9119 号時の波高の予測結果

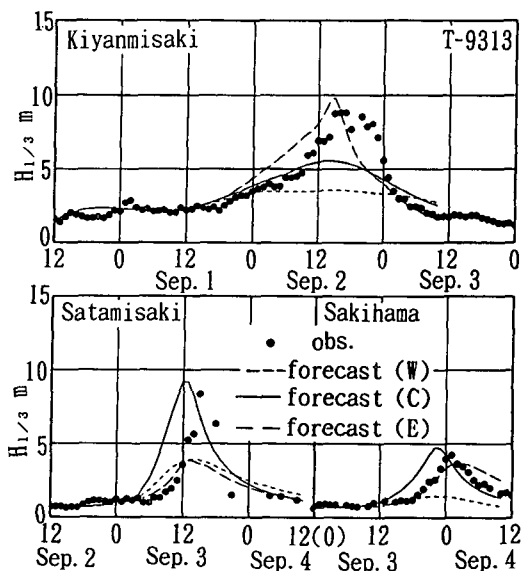


図-4 台風 9313 号時の波高の予測結果

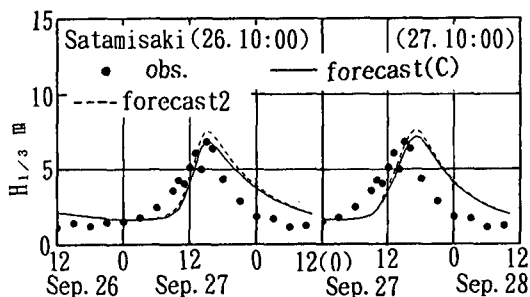


図-5 波高予測結果に及ぼす ΔP および r_0 予測法の影響

は観測値とよく一致するものの、移動速度を過大評価するため、観測値より4時間程度早くピークをとる。台風9313号の実経路は、沖縄西方において予想経路より大きく東方向に変化しており、その結果、喜屋武岬における予測精度は9119号の場合より低い。一方、佐喜浜では台風9313号が台風9119号より近くを通るため、台風9119号時に比べて観測値との対応が向上している。

図-5は台風9119号時における中央予想経路(C)の場合について、2予測開始時点(9月26日10時および9月27日10時)以降の気圧深度および台風半径を回帰予測した場合(forecast C)と、予測開始時点のこれらの値が持続すると仮定した場合(forecast 2)の有義波高時系列の比較を佐多岬について示す。回帰予測値を用いた結果は、一定値を用いた結果に比べて、ピーク波高の減少と観測値とのより良好な対応を生じる。これは、佐多岬付近では、台風勢力が平均的に減衰する特徴を反映した結果である。しかし、この場合、両予測結果の差はわずかであるので、回帰予測値を用いる方法が必ずしも優位であるとはいえない。

4. 瀬戸内海西部海域での高潮予測システムの適用性

4.1 計算条件

図-6は格子間隔5km、格子分割数41×39の瀬戸内海西部海域における高潮計算用格子網であり、図中には予測結果と観測結果の比較を行う潮位観測点(○)と、各格子点における潮汐定数を加重1次補間法の適用によって推定するために、潮汐定数を入力した標準港(●)が示される。高潮予測は全格子点で可能であるけれども、観測結果との比較を行うため、出力は潮位観測点に限定する。高潮計算は、15分ごとに補間した台風属性から求めた海上風および気圧を与えて時間間隔 $\Delta t = 90$ sで行う。

4.2 高潮の予測結果

図-7は9月27日10時を予測開始時点とした台風9119号の3つの予想経路に沿って台風が24時間進行す

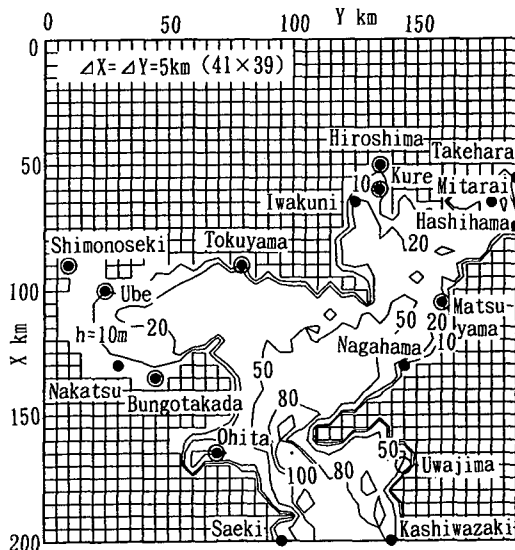


図-6 瀬戸内海西部海域における高潮計算用格子網

ると想定した場合の潮位 η および高潮偏差 ξ 、風速 U_{10} 、風向 θ_w および気圧 P の予測結果と観測結果の比較例を松山および広島について示したものである。この時点における台風予想経路では、進行速度を実際より低く見積もることになったので、風および気圧の予測時系列はいずれの予想経路に対しても、観測時系列より1~2時間遅れる。その結果、潮位および高潮偏差の予測時系列も、観測時系列よりやや遅れるが、観測時系列と比較的よく類似した変化を示す。したがって、全般的にみれば、24時間、実際にはピーク出現時に対して12時間高潮予測はいずれの地点においてもある程度有効であるといえよう。

図-8は9月3日4時を開始時点とした台風9313号の予想経路に沿って台風が36時間進行すると想定した場合の予測時系列と観測時系列を大分および広島において比較したものである。この時刻の台風予想経路は実況台風経路とほぼ合致しているため、風速・風向および気圧の予測結果はいずれの予想経路に対しても、観測結果とほぼ同時刻にピークをとる。しかし、台風が対象領域に接近するにつれて、その勢力が急激に減衰したことから、風および気圧予測時系列のピークも観測時系列のピークより大きい。また、潮位および高潮偏差の予測時系列は高潮の発達期から最盛期にかけて観測時系列と比較的よく一致するが、減衰期では予測時系列に観測時系列にみられない resurgence が現れるため、両者の対応は悪い。

5. 結 語

本研究で得られた結果は、以下のように要約される。

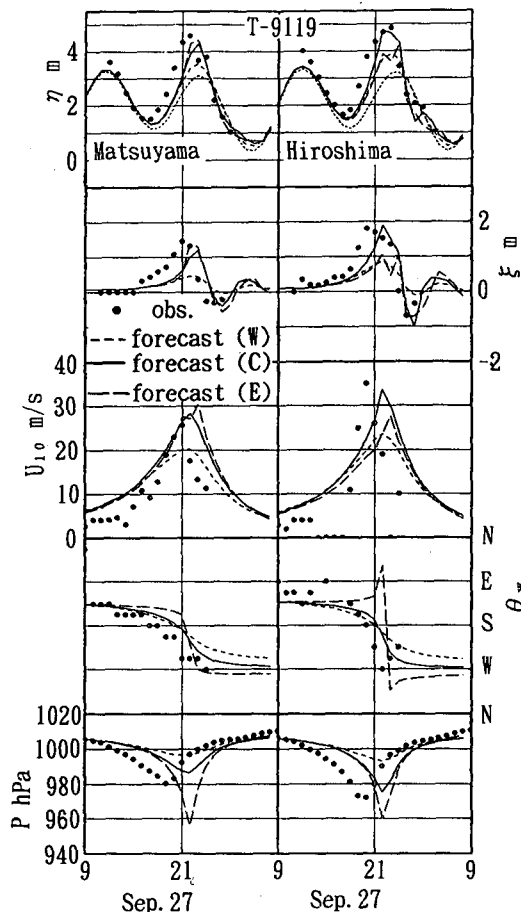


図-7 台風 9119 号時の高潮の予測結果

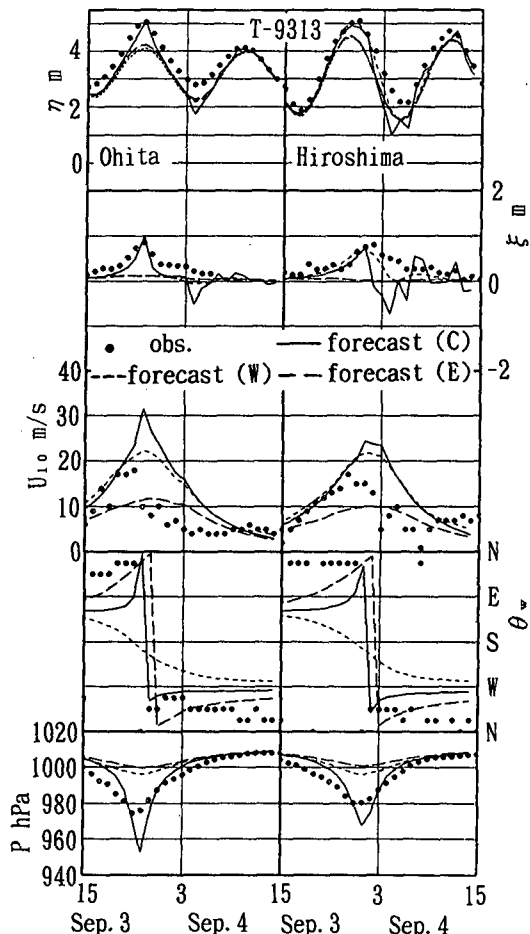


図-8 台風 9313 号時の高潮の予測結果

① 本システムはテレビや新聞で発表される台風予想経路のほか、中心気圧および台風半径の回帰予測値を入力値とすることにより、台風接近時におけるわが国太平洋岸西南部任意地点の波浪時系列あるいは瀬戸内海西部海域の高潮時系列を簡便かつ比較的精度よく予測する。

② 台風半径および気圧深度の回帰予測値を入力値とすることにより、波浪および高潮偏差の予測精度は若干向上するが、台風が急速に衰える場合には、予測精度は依然として十分でない。

③ 台風予想経路の精度を考慮すると、波浪および高潮の予測精度を確保するためには、予測時間はせいぜい 24 時間内にとどめるべきである。

④ 本システムに基づく波浪および高潮の 48 時間予測に必要な時間は、パソコン PC-9821 AP を使用する場

合、データの入力時間も含めてそれぞれ 10 分および 30 分程度であるから、十分実用的である。

参考文献

- 小西達男: 台風による高潮の予報実験 (1994), 1994 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 150-151.
- 藤井 健・光田 寧 (1986): 台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション, 京大防災研年報, 第 29 号 B-1, pp. 229-239.
- 山口正隆・畑田佳男・早川 淳・宇都宮好博 (1989): パーソナルコンピュータを利用した現場用波浪推算モデル, 土木学会論文集, 第 405 号/II-11 (ノート), pp. 259-262.
- 山口正隆・畑田佳男 (1995): 台風時波浪予測システムの適用性, 愛媛大学工学部紀要, 第 14 巻, pp. 251-261.