

わが国太平洋岸における超長期の台風発生波高の極値の推定

山口正隆*・畑田佳男**・中村雄二***・大木泰憲***

1. 緒 言

南西諸島を含むわが国西太平洋岸や東シナ海沿岸での波浪の極値は長期にわたる台風時の波浪追算結果に対する極値統計解析に基づいて推定されてきた(たとえば, 山口ら, 1987)。しかし, これらの研究で追算対象とされた最も新しい気象擾乱の発生以降10年に近い年月が経過する間に, 台風8712号や台風9119号などの巨大台風が波浪観測史を大きく塗り替えるほどの異常波浪をもたらしたことから, 波浪の極値に対する推定結果の見直しが必要とされる時期にきているといえよう。

また, 台風に伴う強風域が数百 km であり, しかも風の時空間変化が著しいことから, 特定地点の高波は台風勢力や台風経路に左右され, たとえば, 同一規模の台風であっても台風経路の偶然性により大きく変わりうる。したがって, 台風に伴う波浪の極値を評価するにあたっては, 台風の統計的性質の解析に基づいて作成した台風属性(中心気圧, 移動速度, 移動方向, 台風半径)に関する確率的台風モデルと, 海上風推算モデルおよび波浪推算モデルの組合せから, 特定地点における異常波浪の極値を推定する方法に基づく検討も必要であろう。

そこで, 本研究では, まず気象庁および運輸省による波浪観測結果と, 1934年~1992年の407個の台風に対する波浪追算結果の極値統計解析に基づいて, 南西諸島を含むわが国西太平洋岸における期間最大波高や50~1000年確率波高の地域特性を検討する。ついで, 確率的台風モデルと, 台風モデル法, 波浪推算モデルおよび極値統計解析モデルを組み合わせた「台風時波浪の極値推算システム」を用いた1000年間の台風や50年間の台風100回に対するシミュレーションから, 1000年という超長期の再現期間をもつ波高の極値や50~1000年確率波高とその変動幅を推定するとともに, 現実の台風に対して推定した波高の極値との比較から, 本システムの有効性を検討する。

2. 観測資料に基づく波高の極値の推定

深海波浪推算モデルを用いた波浪追算資料に対する極値統計解析結果との比較検討を目的とすることから, 波高計の設置水深が大きく, 外洋に直接面した南西諸島を含むわが国西太平洋岸の5波浪観測点(後出の図-2に位置を示す)で取得された気象庁および運輸省波浪観測資料に基づいて, 観測開始年から1992年あるいは観測終了年までの期間最大波高および年最大波高を抽出するとともに, 年最大波高資料に3母数 Weibull 分布(角屋, 1964)をあてはめることにより, 50年~1000年確率波高の推定を行う。ただし, 本研究における母数の推定はすべて積率法による。

図-1は3母数 Weibull 分布のあてはめ結果の2例である。観測期間が短く, 資料数が少ないことから, Weibull 確率紙上に Thomas プロットで図示したデータ点は若干のばらつきを示すけれども, Weibull 分布は年最大波高資料分布を比較的よく近似する。表-1は波浪観測点名, 波高計設置水深, 期間最大波高 $H_{1/3}^{(max)}$ とその発生台風名, 資料個数 N , 50年・100年確率波高 $H_{1/3}^{(50)}$ および $H_{1/3}^{(100)}$ を一括して示したものである。これによると, 期間最大波高はほぼ10mを越え, とくに御坊沖では

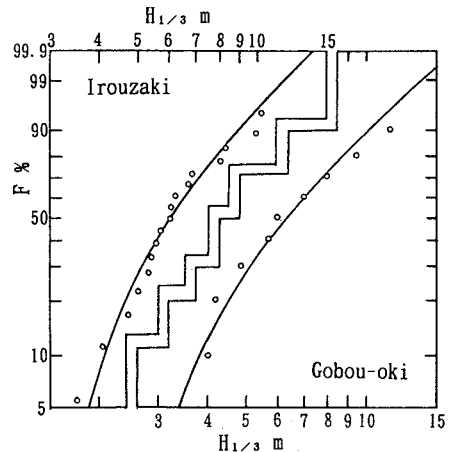


図-1 Weibull 分布のあてはめ(観測資料)

* 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
 *** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

表-1 観測資料に基づく波高の極値

Location	depth (m)	$H_{1/3}^{(max)}$ (m)	typhoon	N	$H_{1/3}^{(50)}$ (m)	$H_{1/3}^{(100)}$ (m)
Irouzaki	50	10.2	8210	17	10.9	11.6
Gobou-oki	170	11.4	8719	9	12.8	13.9
Kouchi-oki	120	10.9	8013	10	11.8	12.8
Aburatsu	49	10.3	8013	16	10.3	11.0
Kiyanmisaki	51	9.9	8712	10	10.7	11.1

11.4 m に達するが、これらはいずれも台風により生起している。また、100 年確率波高も 11 m を越え、とくに御坊沖では 14 m 近くの値、高知沖でも 13 m 近くの値をとる。これら 2 地点の波高計設置水深は 100 m 以上でほぼ深海波を観測しているという特性や、たまたま異常高波が観測されたという偶然性により、他地点に比べて大きな確率波高が得られたと考えられる。しかし、観測期間が短い上に、異常波浪時に欠測を伴うことも少なくないので、観測資料に基づく期間最大波高や確率波高の推定結果に対する信頼性は必ずしも十分とはいえないであろう。

3. 追算資料に基づく台風時波浪の極値の推定

波浪追算には、台風モデル法（佐藤・合田, 1972）で海上風を推定した場合の山口ら（1989）による 1 点深海波浪推算モデル（1 点深海モデルと呼ぶ）を用いる。

図-2 は南北 2800 km、東西 2720 km の西太平洋海域に設けた格子間隔 $\Delta x = 80$ km、格子分割数 36×35 の計算格子網であり、図には波浪観測点および波浪追算点の位置も与えられる。ただし、計算格子網は波向線上格子

点の設置のためにのみ使用される。波向線の長さは、その精度を向上させるため、格子間隔 5 km の西太平洋大領域と格子間隔 1 km の波浪追算点周辺領域よりなる 2 段階格子網で別途計算し、これを入力データとして与えることにより、図-2 の計算格子網上に格子間隔 $\Delta s = 80$ km の波向線上格子点を設ける。

計算に用いる周波数データは 0.04~0.9 Hz 間を不等分割した 20 個、方向データは波浪追算点に到達する波の方向範囲を等分割した 19 個であり、波浪追算は波向線上格子点で台風モデル法により直接計算した海上風を入力することにより 1 時間ごとに行う。

1 点深海モデルはそれほど計算時間を要しないことから、1934 年の台風 3412 号および 1940 年~1992 年の 406 台風の合計 407 台風を対象とした波浪追算を行って台風別最大波高を抽出したのち、1934 年~1992 年の間の期間最大波高を求めるとともに、台風資料が経年的にほぼ網羅されている 1940 年~1992 年の上位 53 個の台風別最大波高資料に対する 3 母数 Weibull 分布のあてはめ結果に基づき、50 年~1000 年確率波高を算出した。

図-3 は波高 2 m 以上の台風別最大波高の追算結果と観測結果の比較を 2 地点について示したものである。これによると、波高の小さいところでのばらつきが大きい、高波高部では誤差 $\pm 20\%$ を示す破線の中に大部分の資料は図示されており、他の地点においても同様の傾向にあることから、1 点深海モデルの追算精度は比較的良好であるといえる。これを地点別にもう少し詳しくみると、御坊沖および高知沖では両者は平均的によく対応するが、石廊崎および喜屋武岬では追算結果が平均的に観測結果より 10% 程度大きい傾向を示し、油津でも若干の過大評価傾向にある。

図-4 は台風別最大波高資料に対する 3 母数 Weibull 分布のあてはめ結果である。この種の図の特徴として、第 1 位あるいは第 2 位波高など高位の波高資料は理論曲線よりはずれる傾向にあるが、追算資料の場合にも 3 母数 Weibull 分布は全般的に資料分布をよく近似する。表-2 は期間最大波高と発生台風名、10 m 以上の高波の発生回数および 50 年・100 年確率波高の一覧表である。

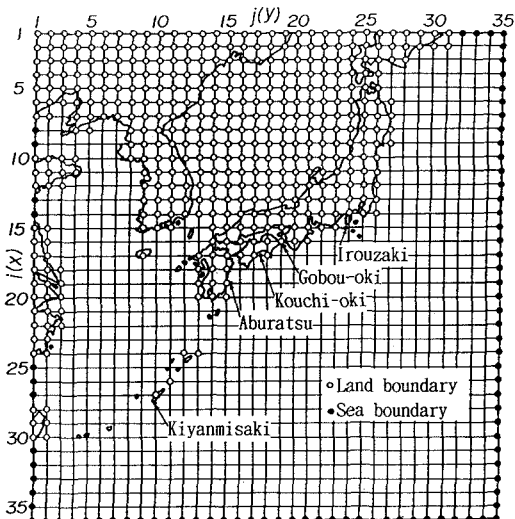


図-2 計算格子網および波浪観測・追算点の位置

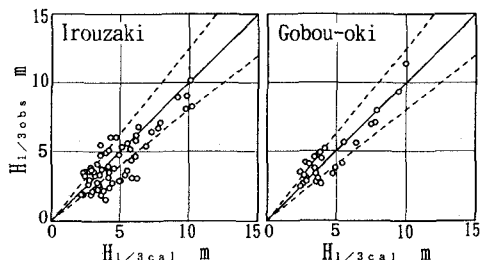


図-3 台風別最大波高に対する追算結果と観測結果の比較

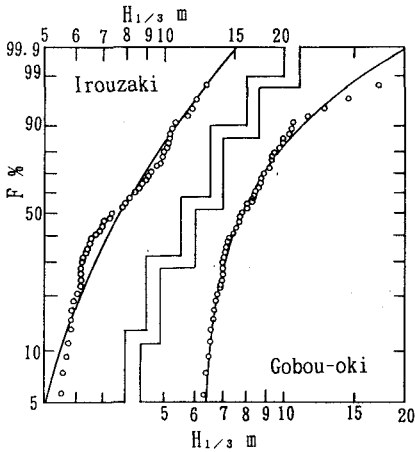


図-4 Weibull分布のあてはめ (追算資料)

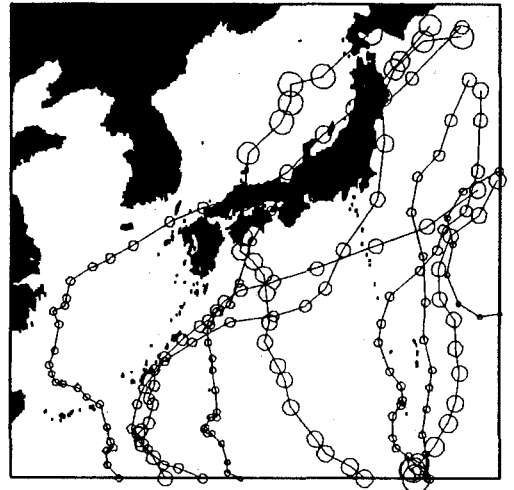


図-5 シミュレートされた1年間の台風経路と台風半径

表-2 追算資料に基づく波高の極値

location	$H_{1/3}^{(max)}$ (m)	typhoon	freq. $\geq 10m$	$H_{1/3}^{(50)}$ (m)	$H_{1/3}^{(100)}$ (m)
Irouzaki	12.7	4420	10	12.6	13.3
Gobou-oki	17.2	6118	8	14.5	16.0
Kouchi-oki	14.0	6118	12	13.2	14.1
Aburatsu	12.8	5412	9	12.1	12.8
Kiyannisaki	14.2	5115	20	13.5	14.1

期間最大波高はいずれの地点でも 12 m を越えるが、御坊沖で 17 m (第 2 室戸台風)、高知沖で 14 m (第 2 室戸台風) に達し、このほか台風の常襲経路に位置する喜屋武岬でも 14 m を越える。また 10 m 以上の高波の発生回数は本州西太平洋岸では 8~12 回であるのに対し、喜屋武岬では台風の来襲頻度に相当して 20 回を数える。一方、100 年確率波高も期間最大波高と同様の地域特性を示し、石廊崎および油津ではほぼ 13 m 台、高知沖および喜屋武岬では 14 m 台であるのに対して、御坊沖では 16 m を越える。つまり、石廊崎は台風勢力がやや減衰する位置に、油津は、平均的に NE 方向をとる巨大台風の経路からみて、九州本島の遮蔽効果を受ける位置にあるので、巨大台風の経路にあたる御坊沖や高知沖あるいは喜屋武岬ほど来襲波浪の規模は大きくならないと考えられる。

4. シミュレーション資料に基づく波高の極値の推定

4.1 確率的台風モデルの概要

1951 年から 1991 年の間の 320 台風の統計的な特性の検討から、確率的台風モデルを作成し、モンテカルロ法により超長期の台風をシミュレートする。シミュレーションの方法は次のようである。①ポアソン乱数を発生さ

せて各年ごとの台風発生個数を定める。②台風初期位置の累積分布に一樣乱数を与えて台風の初期位置データを発生させる。③初期位置における台風属性をその位置におけるスプライン関数近似値と、平均値からの変動量に対する区間別経験的確率分布関数に一樣乱数を与えて得られる残差との和により決定する。④時刻 i の台風位置とその位置での台風属性は時刻 $(i-1)$ におけるそれぞれについての一次回帰式による値と一樣乱数を与えて得られる変動量の和として求められる。なお、台風属性が極端に変化しないように、1 回の計算における台風属性の変化量があらかじめ求めた限界台風属性変化量内に収まるまで乱数発生を繰り返す。⑤時間間隔を 6 時間とする以上の計算を、対象領域内に台風が存在する間、または中心気圧が 1010 hPa 以上に減衰するまで繰り返す。

1000 年を対象期間とした台風属性のシミュレーション結果によれば、本モデルは台風属性の平均特性のみならず台風の北上に伴う転向や減衰、台風属性の連続的変化などを再現することが確認された。図-5 はシミュレートされた 1 年間の台風経路および台風半径の例を示したものであり、その経路特性は現実の台風のものによく似ている。

4.2 波高の極値の推定

確率的台風モデルと、台風モデル法および 1 点深海モデルの組み合わせにより、5 地点において、まず 1000 年間にわたる台風時波浪をシミュレートするとともに、上位 1000 個の台風別最大波高資料に 3 母数 Weibull 分布をあてはめ、50 年~1000 年確率波高を求めた。ついで、50 年間の台風時波浪を 100 回 (5000 年相当) シミュレートし、各ケースごとの上位 50 個の台風別最大波高資料に 3 母数 Weibull 分布をあてはめて、50~1000 年確率波高を

求めるとともに、それらの平均値、標準偏差および最大・最小値を算出した。波浪推算における計算格子網、推算点位置、周波数・方向条件、格子間隔および計算時間間隔は3.と同一である。また、波高の極値の推定精度を損なわずに計算機使用時間を短縮するため、シミュレートした台風のうち、①推算対象地点を中心とする半径250 km以下の円内を通過し、そこでの最低中心気圧が990 hPa以下、②推算対象地点を中心とする半径350 km以下の円内を通過し、そこでの最低中心気圧が980 hPa以下、③推算対象地点を中心とする半径450 km以下の円内を通過し、そこでの最低中心気圧が970 hPa以下の台風を波浪推算対象とした。この結果、たとえば、1000年間を対象とした台風のシミュレーションで実際に波浪推算を行い、台風別最大波高を求めた台風の個数は総発生台風約7800個のうち2000~2600個となるが、①~③の条件により上位1000位内の台風別最大波高をもたらす台風はほぼ網羅されていると考えられる。

図-6は上位1000個の台風別最大波高資料に対する3母数Weibull分布のあてはめ結果の2例を示す。この場合には資料数が多いことから、その適合度は最上位の資料を除いて良好である。表-3は観測結果、53年間の台風に対する波浪推算結果および1000年1回のシミュレーションに基づく期間最大波高および100・1000年確率波高と、50年100回のシミュレーションに基づくそれぞれの平均値(m)、標準偏差(σ)、最大値(max)および最小値(min)の一覧を示したものである。この表によると、いずれの地点でも観測結果に基づく波高の極値が推算結果に基づくものより小さい。これは、観測期間が短いため、観測開始前に生じた異常波高が観測結果に含まれていないことや、推算結果が水深の影響を含んで

いないことによるところが大きい。また、3種類の推算結果のうち、期間最大波高は当然対象年数が長いほど大きく、高知沖での18.4 mが全体の最大値を与える。一方、3種類の推算結果に基づく確率波高は石廊崎、油津および喜屋武岬では比較的よく対応するが、御坊沖および高知沖のうち、とくに御坊沖では、過去53年間の台風に対する確率波高がシミュレーション結果に基づくものよりかなり大きい。これは最長5000年間のシミュレーションにおいても御坊沖に巨大な波高をもたらした台風6118号級の勢力と経路をもつ台風がたまたま再現されていないためである。しかし、高知沖では、台風6118号時の最大波高をはるかに上まわる異常波高が計算されている。このことから、台風経路とそのときの台風勢力の重なり合いの偶然性が特定地点の波高に非常に大きい影響をもつことが示唆される。

ついで、100年確率波高の地点間の波高差は、1000年1回のケースでは1.7 m(波高範囲12.9~14.6 m)および50年100回(5000年相当)のケースのうち平均値では1.8 m(12.6~14.4 m)であるのに対し、1000年確率波高の差はそれぞれ1.3 m(15.6~16.9 m)および1.7 m(15.1~16.8 m)となっており、再現期間が長いほど地点間の波高差が減少するという特徴がみられる。この傾向は期間最大波高の場合も同様であり、1000年1回のケースでは3.6 m(14.8~18.4 m)、50年100回のケースのうち最大値では2.1 m(16.3~18.4 m)というように、対象期間が長いほど地点間の波高差が減少する。5地点中の期間最大波高の第1位は高知沖で得られた18.4 mであるから、この結果はわが国西太平洋岸での台風発生最大波高に上限が存在することを意味するのかもしれない。ただ

表-3 シミュレーション資料に基づく波高の極値

location	height (m)	obs.	tyn. 53ys.	tyn. 1000ys.	tyn. 50 ys. 100 times			
					m	σ	max	min
Irouzaki	$H_{1/3}^{(max)}$	10.2	12.7	14.8	13.3	1.2	17.4	10.4
	$H_{1/3}^{(100)}$	11.6	13.3	13.5	13.5	1.0	16.0	10.9
	$H_{1/3}^{(1000)}$	13.8	15.2	16.0	16.0	1.6	20.9	12.2
Gobou-oki	$H_{1/3}^{(max)}$	11.4	17.2	15.0	13.1	1.3	16.3	9.6
	$H_{1/3}^{(100)}$	13.9	16.0	13.5	13.3	1.1	16.4	10.5
	$H_{1/3}^{(1000)}$	16.9	20.8	16.3	16.0	1.9	21.9	11.9
Kouchi-oki	$H_{1/3}^{(max)}$	10.9	14.0	18.4	12.7	1.5	18.4	9.7
	$H_{1/3}^{(100)}$	12.8	14.1	13.3	12.8	1.1	16.4	10.2
	$H_{1/3}^{(1000)}$	15.8	16.9	16.6	15.5	1.8	22.6	11.2
Aburatsu	$H_{1/3}^{(max)}$	10.3	12.8	15.3	12.6	1.4	16.8	10.4
	$H_{1/3}^{(100)}$	11.0	12.8	12.9	12.6	1.0	15.5	10.8
	$H_{1/3}^{(1000)}$	13.5	14.7	15.6	15.1	1.8	21.3	12.2
Kiyamisaki	$H_{1/3}^{(max)}$	9.9	14.2	15.9	14.1	1.2	17.2	11.5
	$H_{1/3}^{(100)}$	11.1	14.1	14.6	14.4	1.0	16.5	12.1
	$H_{1/3}^{(1000)}$	12.3	16.0	16.9	16.8	1.5	20.7	13.6

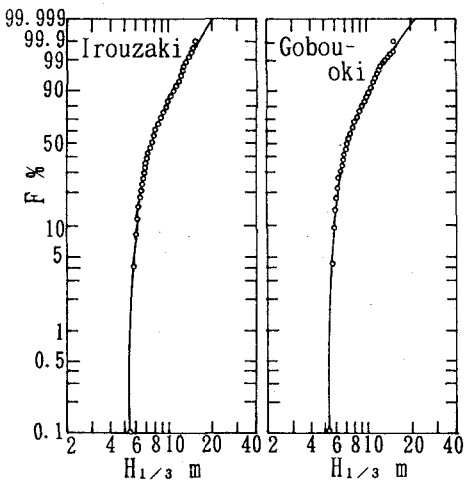


図-6 Weibull分布のあてはめ(シミュレーション資料)

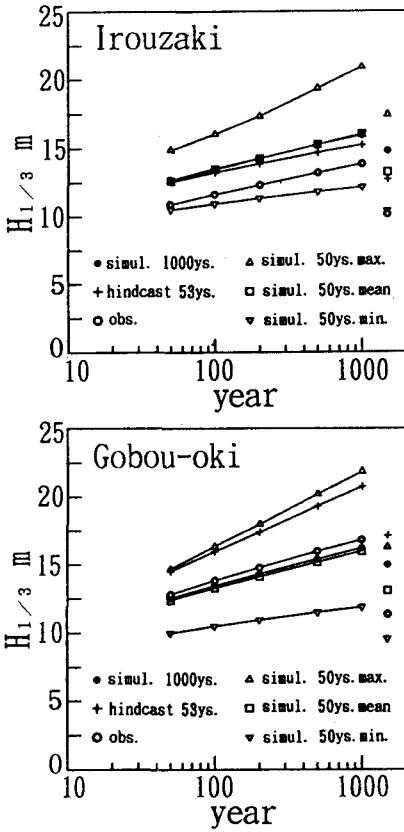


図-7 各種資料に基づく波高の極値

し、50年100回ケースの確率波高の最大値および最小値における地点間の波高差は、50年間の資料に基づいて1000年確率波高を推定するという極値統計解析に伴う精度上の制約のため、再現期間が長いほど拡大する。

図-7は各種の方法に基づく波高の極値(図中の右端が期間最大波高)を図示したものの2例であり、それぞれの波高の極値は黒丸(1000年間1回のケース)、四角、上三角および下三角(50年間100回のケースのうちの平均値、最大値および最小値)、プラス印(53年間の台風ケース)および白二重丸(観測資料)によって表される。まず、石廊崎では、3種類の推算結果に基づく確率波高(50年100回のケースでは平均値)や1000年1回のケースを除く期間最大波高はほとんど一致する。一方、観測資料に基づく確率波高は推算結果に基づく確率波高より

2m程度小さい値をとるが、確率波高の最大値と最小値を示す線の間位置することから、台風の経路や規模によっては、この確率波高はある程度変動しようと考えられる。こうした傾向は油津および喜屋武岬においても見出しされるが、喜屋武岬では推算結果が観測結果より過大な値を与える傾向にあることから、観測資料に基づく確率波高は確率波高の最小値線以下に図示される。ついで、御坊沖では、観測資料およびシミュレーション資料に基づく確率波高間の差は小さいのに対して、53年間の推算資料に基づく確率波高は50年100回のシミュレーション資料に基づく確率波高の最大値に近い値をとり、高知沖でもシミュレーション資料に基づく確率波高の平均値よりかなり大きい値を示す。この結果は、極値統計解析に伴う誤差のほか、台風経路と台風勢力の偶然的な重なり合いが波高の極値に大きく影響することを示唆するものと解釈されよう。

5. 結 語

台風経路や巨大台風の偶然的重なり合いによっては、過去数十年間の期間最大波高を上回る異常波高が発生する可能性があることから、過去の台風に対する推算結果や観測結果に基づく波高の極値の推定結果はある程度の不確実性を伴うといえる。したがって、確率波高や設計波高の決定においては、台風経路や台風勢力の偶然性が波高の極値に及ぼす影響を考慮することが望ましいと考えられる。こうした観点から、確率的台風モデルと台風モデル法、波浪推算モデルおよび極値統計解析モデルを組み合わせた本システムは、わが国沿岸で台風の影響が支配的な海域の任意地点において、超長期の再現期間をもつ台風発生波高の極値とその変動幅を推定するのにきわめて有効である。

参 考 文 献

角屋 睦 (1964): 水文統計論, 水工学に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ, 64-02, 土木学会水理委員会, 59 p.
 佐藤昭二・合田良實 (1972): 海岸・港湾, わかり易い土木講座 17, 彰国社, pp. 104-106.
 山口正隆・畑田佳男・小渕恵一郎・日野幹雄 (1987): 波浪推算に基づくわが国太平洋岸での台風発生最大波高の地域分布の推定, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 131-140.
 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. 256-262.