

瀬戸内海における波浪推算に基づく確率波高の推定

Estimating Return Wave Height in the Seto Inland Sea Based on Wave Hindcasting

畑田佳男¹・山口正隆²・野中浩一³・大福 学⁴

Yoshio HATADA, Masataka YAMAGUCHI, Hirokazu NONAKA and Manabu OHFUKU

Shallow water wave hindcasting for each of many intense storms in the past 45 years was conducted on 3 sea areas of the Seto Inland Sea using input wind distributions of the wind data acquired at on-land meteorological stations around the Inland Sea. A high quality of wave hindcasting is ensured by a reasonable agreement between the measurements and hindcasts for many cases of the peak wave height during any given storm. Extreme value analysis yields an estimate of 50-year return wave height in the areas (H_{50}), and the H_{50} value ranges from 10 to 12 m in the outer area connecting to the open ocean and from 3 to 8 m in the inner area, depending greatly on the topological situations. Also, the effects of AM or POT-based data extraction method, data period length and other factors on the estimate of H_{50} are discussed.

1. 緒言

瀬戸内海における確率波高の推定は関係各機関で行われてきたが、その結果は論文としてほとんど公表されていないし、また波浪推算に用いられた海上風分布は地形の影響を含まない傾度風モデルによるものが大部分である。こうした状況の中、畑田ら(2008)は地形の影響を含む海上・沿岸の観測風資料より得た1978～2005年(28年間)のストーム時海上風分布を入力条件とする波浪推算の結果を用いて50年確率波高とその変動範囲を推定した。続いて、畑田ら(2009)は1960年代前半に来襲した巨大台風である台風6118号、台風6420号、台風6523号に対する波浪推算に基づいて、これらの台風に伴う波高が瀬戸内海の東部海域で畑田ら(2008)による50年確率波高の推定値をかなり上まわる可能性があることを示唆した。

ここでは、1961～2005年の45年間に気象官署で取得された観測風(SDP風)資料より推定した海上風分布を入力条件とする波浪推算を1961～2005年の多数ケースのストームに対して行い、推算結果に対する極値統計解析に基づいて50年確率波高とその変動範囲を再評価する。

2. 波浪推算と極値統計解析の方法

(1) 海上風分布資料

波浪推算にあたり外洋と内海でそれぞれ海上風分布資料を用意する。すなわち、外洋では北西太平洋に設けた格子間隔80kmの格子網における表面風解析値(NCEP風

資料)に楕円型気圧分布の仮定に基づく台風モデル風を組み込んだ海上風分布の1時間間隔値(畑田ら, 2005)を用いる。期間は1948～2008年の61年である。

内海では、瀬戸内海を囲む気象官署で取得されたSDP風資料および対象領域の外洋境界上の複数地点における台風モデル風を埋め込んだNCEP風資料を用いて、対象領域内の海上・沿岸風観測地点における風を補間し、これと当該地点で取得された観測風との関係を定数項付きベキ乗型回帰式(たとえば、 $y=ax^b+c$)で考慮して海上・沿岸観測地点における観測相当風を推定する。ついで、観測相当風と境界地点の風に空間補間法を適用して格子間隔2kmの格子網上で海上風分布を求める。方法の詳細は山口ら(2009)に述べる。期間は1961～2005年の45年、時間間隔は1時間である。

(2) 波浪推算の方法

波浪推算は、図-1に示すように瀬戸内海を3つに分割した西部、中部、東部の各海域(格子間隔1km)において上記の内海海上風分布を入力条件として、水深の制約に伴う碎波減衰を段波モデルで近似した格子点浅海モデル(山口ら, 1984)により2～4日のストーム期間について時間間隔1分で行う。海上風分布の入力時間間隔は20分であり、1時間ごとの海上風分布を時間に関して20分ごとに線形補間、空間に関して1kmごとに4点双1次補間したものを20分の間一定として計算を進める。周波数データの個数は0.047～1Hz間を不等分割した20個、方向データの個数は0～360°を20°で等分割した19個、あるいは10～20°で不等分割した24個(西部海域)または27個(東部海域)である。巨大台風時にS方向からの異常波浪が西部海域の豊予海峡や東部海域の紀淡海峡・鳴門海峡から内海・内湾に伝播する場合には、これを適正に評価するために、間隔を小さくした方向データを使用する。

1 正会員 工(博) 愛媛大学講師大学院理工学研究科
2 正会員 工博 愛媛大学名誉教授
3 正会員 工(博) 愛媛大学契約職員工学部
4 愛媛大学技術専門職員工学部

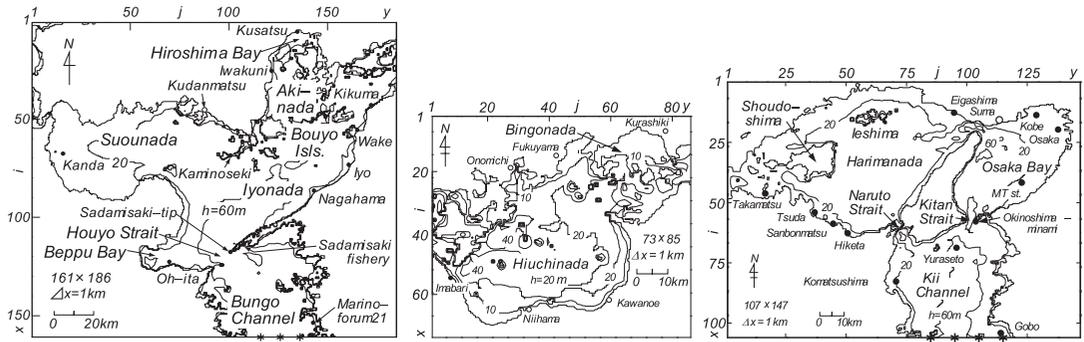


図-1 波浪推算領域（西部海域，中部海域，東部海域）

西部海域と東部海域における波浪推算では、それぞれ外洋に接続する豊後水道境界上の3地点（図-1左図の*印）と紀伊水道境界上の4地点（図-1右図の*印）に、台風モデル風を組み込んだNCEP風資料（外洋）とSDP風資料（内海域）に基づく海上風分布を入力条件として1点浅海モデル（山口ら，1987）により1時間ごとに計算した方向スペクトルを流入境界条件として与える。方向スペクトルの値は時間に関して1分間隔，空間に関して1km間隔で線形補間する。図-2に示すように，計算には格子間隔5kmの北西太平洋領域と0.5kmの瀬戸内海よりなる2段階高地形解像度格子網を用いる。なお，中部海域は周囲が陸地で囲まれた閉海域と仮定する。

(3) 対象海域別ストームの選択

波浪推算の対象とするストームは，上述した海上風分布を入力条件として，高地形解像度格子網での1点浅海モデルにより，内海の外海部と内海部の代表地点ごとに得た45年間1時間ごとの波浪推算結果を主体とし，風と波浪の観測資料や既往の波浪推算資料の条件，天気図な

どを包括的に考慮して海域ごとに抽出する。期間は2～4日，ケース数は西部海域で256（139台風），中部海域で174（80台風），東部海域で181（71台風）である。

(4) 極値統計解析の方法

極値統計解析には，Gumbel分布，Weibull分布（形状母数 $k=0.5\sim 10$ の27種類），FT-II型分布（形状母数 $k=2.5\sim 40$ の20種類）の計48種類を候補分布とし，尺度母数と位置母数の推定を最小2乗法，最適分布の選択を最大相関係数基準，確率波高の分散の推定をjackknife法によるYamaguchi・Hatada（1997）のモデルを用いる。波高の極値資料として，各格子点におけるストーム時最大波高から極大（POT）波高資料と年最大（AM）波高資料を海域ごとに作成する。AM資料は資料年数 K ，資料数 N ，資料総数 N_T を $N_T=N\cdot K$ として，極大波高資料は資料数 N を資料年数の2倍（ $N=2K$ ），資料総数を $N_T=N$ として解析する。

3. 波浪推算精度の検証

図-3は各海域の観測地点で得たストーム時ピーク波高 H_p に対する推算値と観測値の比較を西部海域と東部海域について与える。比較地点は西部海域でマリノフォーラム21，佐田岬漁港，佐田岬先端，大分，荻田，上関，岩国，草津，長浜，伊予，和気，菊間，東部海域で御坊，由良瀬戸，小松島，沖ノ島南，MT局，大阪，神戸，江井ヶ島，引田，三本松，津田，高松である。全体の資料

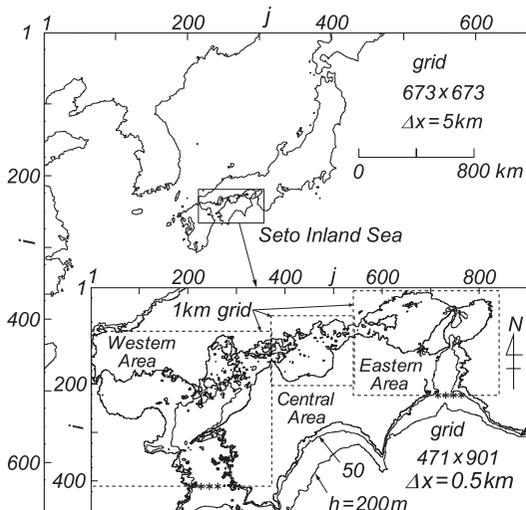


図-2 外洋境界における波浪推算領域（北西太平洋）

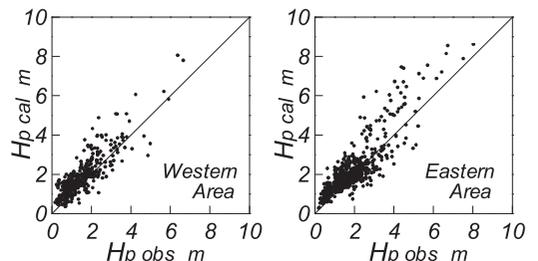


図-3 ストーム時ピーク波高の比較

期間は西部海域で1969～2005年，東部海域で1971～2005年に及ぶ。外洋波浪の影響が大きい高波高部では推算値が観測値よりやや大きい値を与えるが，内湾・内海発生波浪資料が多くを占める中規模以下の波高部では推算値は観測値と比較的よく符合する。この結果は本研究の波浪推算の信頼性をおおむね担保する。なお，西部海域と東部海域における海上・沿岸風観測地点におけるピーク風速に関して，SDP風資料に基づく推算値と観測値は平均的によく符合することが山口ら (2010) に示される。

4. 確率波高の空間分布

(1) 海域別確率波高

図-4は各海域の格子点別 POT 資料に上述の極値統計解析モデルを適用して得た50年確率波高 H_{50} の空間分布を西部，中部，東部の各海域について与える。50年確率波高は西部海域では豊後水道で10～12m，内海部で3～8mを与える。内海部では外洋波浪が入射・到達する豊予海峡から山口県下松に至る海域で7～8mと大きく，そこから放射状に3～4mにまで小さくなる。内海発生波浪が卓越する周防灘西部，伊予灘東部，別府湾で H_{50} はおおむね5mを上限とし，安芸灘で4m，広島湾で3mを示す。中部海域では備後灘で2.5m，燧灘西部で4～4.5m，燧灘東

部で3.5mを与え，西側の海域で大きい。東部海域のうち紀伊水道で10～12m，大阪湾で4～7m，播磨灘で4～5m弱をとる。大阪湾では紀淡海峡から兵庫県須磨に至る海域で，播磨灘では鳴門海峡から小豆島，家島にかけての広い海域で大きい。

図-5は H_{50} の標準偏差 $H_{\sigma 50}$ を H_{50} で除して得た変動係数(%)の空間分布を示す。変動係数は2～12%を与え， H_{50} と同様に強い海域依存性をもつ。変動係数を海域別にみると，西部海域では2～9%であり，広い海域で6%を越えるが，周防灘西端部や伊予灘では4%より小さい。中部海域では2.5～12%をとり，北側海域の2.5～3%から西側海域の10～12%に向けてSW方向に増加する。これは H_{50} の空間分布と概略符合する。東部海域でも3～12%を与え，紀伊水道で4～8%，大阪湾で6～12%，播磨灘で3～8%を示す。とくに，大阪湾のうちMT局から大阪，神戸にかけての東側あるいは北東側の海域で10～12%と大きい値をとる。これは台風6118号などに伴う1965年以前の突出した異常波高の出現を反映する。

つぎに，図-6はAM資料およびPOT資料に基づく確率波高 H_{50AM} と H_{50POT} の差 $(H_{50AM}-H_{50POT})/H_{50POT}$ ならびにそれぞれの標準偏差の差 $(H_{\sigma 50AM}-H_{\sigma 50POT})/H_{\sigma 50POT}$ に関する%値を西部海域で与える。無次元確率波高の差は大部分の海域で±3%以内の範囲に入るが，周防灘西端部や

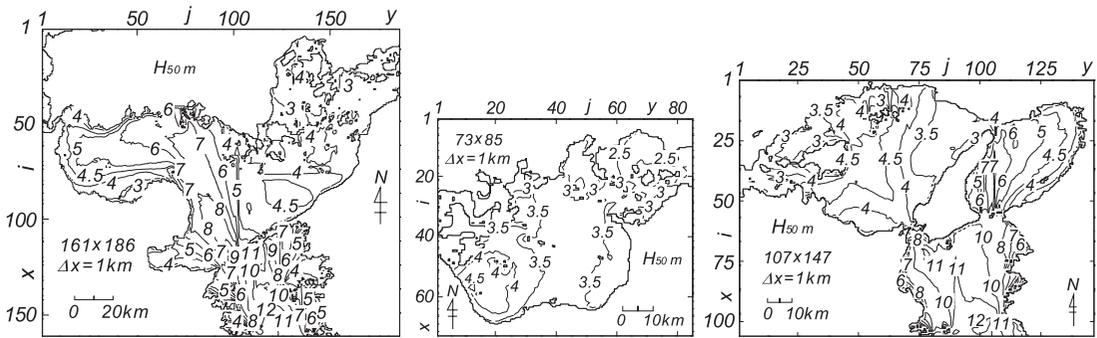


図-4 50年確率波高 (西部海域，中部海域，東部海域)

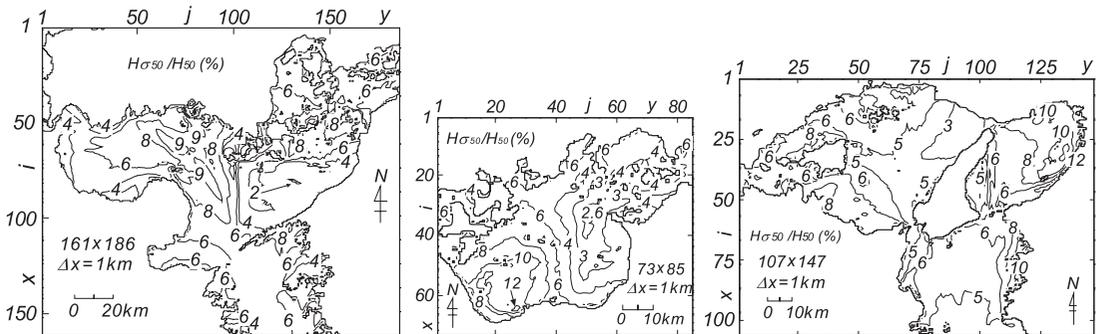


図-5 50年確率波高の変動係数 (西部海域，中部海域，東部海域)

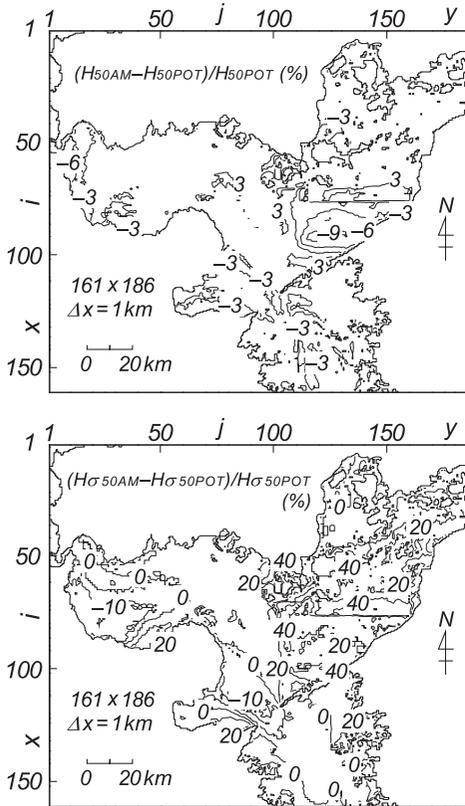


図-6 50年確率波高およびその標準偏差の差 (西部海域)

伊予灘中部では H_{50POT} が H_{50AM} と比べて6%以上大きい。これはこれらの海域におけるAM資料およびPOT資料に対する最適分布の適合度が必ずしも高くないために生じた結果である。中部海域と東部海域では、確率波高の差は±3%以内の範囲にほぼ納まる。標準偏差については、資料数が多いPOT資料がAM資料より小さい値をおおむね生じる。その程度は0~40%と広い範囲に分布するが、選択された最適分布の種類によってはAM資料より10%大きい値を与える海域もある。同様の特徴は中部海域と

東部海域においてもみられる。

図-7は畑田ら(2008)による波浪推算期間にあたる1978~2005年(28年間)と今回のSDP風資料期間である1961~2005年(45年間)のPOT資料より推定した50年確率波高の差 $(H_{50}-\tilde{H}_{50})/\tilde{H}_{50}$ の%値を西部, 中部, 東部の各海域で示す。 \tilde{H}_{50} は前者の資料による確率波高を表す。西部海域では、確率波高の差は±10%以内の範囲にあり、豊後水道から周防灘西部や伊予灘東部, 安芸灘南部などの海域を除いて、資料期間の増加に伴い確率波高の推定値はやや小さくなる。しかし、延長期間にあたる1961~1977年の間に最大級の異常波高が生起していないことから、中部海域や東部海域に比べて確率波高に及ぼす資料期間長の影響は少ない。中部海域では、確率波高の差は-10~30%をとり、燧灘では西側あるいは南西側の海域ほど、資料期間の増加によって確率波高の推定値が大きくなる。これは台風7010号などに伴う異常波高が極値解析に含まれることによる。東部海域では、確率波高の差は0~30%の範囲にあり、大阪湾や紀伊水道および播磨灘の西側海域で20~30%に達する。東部海域では資料期間の延長に伴い、確率波高の推定値が海域全体で増大する。これは台風6118号, 台風6420号, 台風6523号など1965年以前の巨大台風に伴う異常波高の影響による。したがって可能であれば、波浪推算の対象期間をできるだけ長くにとって、巨大台風に伴う異常波高を遺漏なく含めた極値資料に対して極値解析を行うことが、統計的に安定した確率波高の推定値を得るために望ましいと言えよう。

(2) 期間最大波高と確率波高の比較

図-8は45年間の期間最大波高 H_{max} とPOT資料より推定した50年確率波高 H_{50} の差 $(H_{max}-H_{50})/H_{50}$ の%値を3海域で与える。資料期間45年と再現期間50年は近い値であるので、両者の比較が可能であろう。西部海域では、 H_{max} と H_{50} は±5%以内の範囲でほぼ対応するが、防予諸島の周辺海域や伊予灘東部などでは、最上位値付近の値がやや突出した値をとることから、 H_{max} が H_{50} を10%程

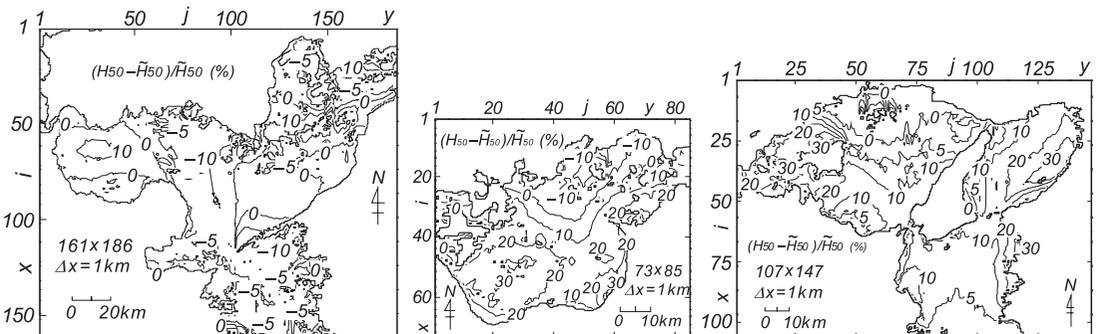


図-7 資料期間長に伴う50年確率波高の差 (西部海域, 中部海域, 東部海域)

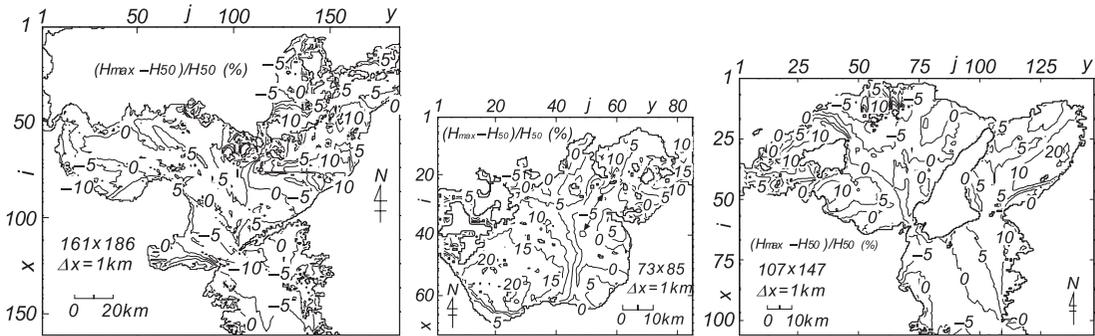


図-8 期間最大波高と50年確率波高の差 (西部海域, 中部海域, 東部海域)

度上まわる。 H_{max} をもたらした擾乱は台風7009号, 台風9119号, 台風0418号, 台風9918号, 台風7010号, 台風8013号, 台風6118号であり, 小海域ごとに異なる。中部海域では備後灘から燧灘東部にかけて $\pm 5\%$ 以内の差に納まるものの, 燧灘の西部あるいは南西部に向うほど H_{max} が H_{50} を上まわり, その差は20%に達する。この海域の H_{max} は台風7010号, 台風9119号, 台風6420号により生じており, かなり突出した値をとる。東部海域でも H_{max} と H_{50} の差は紀伊水道や播磨灘で $\pm 5\%$ 以内にあるが, 大阪湾では西部から東部に向けて20%に達する。また播磨灘の西部や紀伊水道の東部でも10%程度をとる。 H_{max} の生起は大阪湾で台風6420号, 台風6523号や台風6118号, 播磨灘で台風6523号, 紀伊水道で台風6118号による。要するに, H_{max} に及ぼす1960年代の3巨大台風である台風6118号, 6420号, 6523号の影響は中部海域と東部海域で非常に大きい。

5. 結語

本研究で得られた知見は次のようにまとめられる。

- ① SDP風資料を入力条件とする波浪推算は内海部における波高観測値を比較的適正に再現するが, 外洋波浪の影響が強い地点ではやや過大評価傾向を与える。
- ② 50年確率波高 H_{50} は外洋波浪の影響が大きい紀伊水道や豊後水道で10~12m, 外洋波浪の伝播をうける大阪湾西部や伊予灘西部から周防灘東部海域で6~8mをとり, そこから3~4mに放射状に減少する。内湾発生波浪が卓越する海域ではおおそ5mを限度とする。 H_{50} の変動係数はおおむね2~12%を与え, 大部分の海域で6~8%以下であるが, 最上位値が突出する地点で, 12%までの値をとり, H_{50} と同様に強い海域依存性をもつ。
- ③ AM資料とPOT資料より得た50年確率波高の差は大部分の海域で $\pm 3\%$ 以内の範囲に納まるが, 最適分布の適合度の不足によって, 差が10%に達する小海域もある。

標準偏差はAM資料よりPOT資料に基づく結果で最大40%小さい。

- ④ 50年確率波高に及ぼす期間長の影響は, 1960年代の異常波高が含まれる東部海域, ついで中部海域で顕著である。期間長の増加により30%大きくなる小海域もある。確率波高の推定にあたっては資料期間の延長が望ましい。
- ⑤ 期間最大波高と50年確率波高の差はおおむね $\pm 5\%$ の範囲に納まるが, 期間最大波高が突出する地点では, 50年確率波高を20%程度上まわる地点もある。

参考文献

- 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.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一 (2009): 1960年代前半の3巨大台風時の大阪湾・紀伊水道における波浪の推定, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 201-205.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一・森 正憲 (2008): 瀬戸内海における確率波高の推定, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 131-135.
- 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄 (2009): SDP風資料を用いた内湾・内海における45年間の海上風分布データセットの作成, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 186-190.
- 山口正隆・大福 学・野中浩一・日野幹雄・畑田佳男 (2010): 1918~1965年の18巨大台風時の瀬戸内海における海上風分布の再現, 海洋開発論文集, Vol.26, pp. 441-446.
- 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.
- 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄 (1984): エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予知モデルについて, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127.
- Yamaguchi, M. and Y. Hatada (1997): An extremal analysis system and its application to the estimation of extremes of meteorological and oceanographic elements around the coasts of Japan, Proc. WAVES97, Vol.2, pp. 932-946.