

SDP風資料を用いた内湾・内海における45年間の波浪推算システム －東京湾の場合－

A 45-Year Wave Hindcast System in the Inner Bay Areas and Inland Sea of Japan Using SDP Measurements-Based Winds -Tokyo Bay Case-

山口正隆¹・畑田佳男²・大福 学³・野中浩一⁴・日野幹雄⁵

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

A long-term wave hindcast system applicable for the wave computations over a 45-year period at an arbitrary location of Tokyo Bay area is reconstructed. Hourly sea wind distributions estimated by making use of an analogy between land-based SDP wind measurement data and coast- and sea-based wind measurement data are given on the coastal sea area and those made by recompiling the NCEP/NCAR reanalysis surface wind product on the open ocean. Wave computation is based on a backward ray tracing model on a nested grid with very high space resolution. Comparison between hindcasts and measurements for wave height over a long period of 10 to 23 years at 5 stations situated inside and outside of Tokyo Bay verified a reasonable performance of the system.

1. 緒言

周辺地形の影響を強く受けるわが国の内湾・内海で高い精度の長期波浪推算を可能にするために、山口ら(2006, 2007)や日野ら(2008)は外洋では気象研究機関による表面風再解析/解析資料に台風モデル風を組込んで作成した海上風分布資料(畑田ら, 2005)、内湾・内海ではその沿岸部と海上部で取得された風観測資料を用いて作成した海上風分布資料(山口ら, 2009a)を入力条件とし、波浪推算を1点浅海モデル(山口ら, 1987)による長期波浪推算システムを構築するとともに、内湾・内海における波浪観測資料との比較に基づいてその精度を明らかにしてきた。対象期間は入手しうる風観測資料の制約のため、最長のもので1979年以降の26年である。しかし、長期にわたる波浪状況を検討するためには、波浪推算精度をあまり損うことなしに対象期間をさらに延長することが望ましい。

そこで本研究では、外洋における海上風分布資料(畑田ら, 2005)と波浪推算モデル(山口ら, 1987)をそのままにし、内湾・内海における海上風分布資料を、対象海域の周辺に広く分布する気象官署で取得された1961年以降の定時風観測資料(Surface Data Point: SDP風資料)を用いて作成した海上風分布資料(山口ら, 2009c)に変更した波浪の長期推算システムを新たに構築する。そして、内湾・内海のうち東京湾を含む関東沿岸海域を対象として、東京湾内外の5波浪観測地点で45年間の波浪

推算を実施し、観測資料との比較からその精度を明らかにするとともに、45年間の波浪推算資料を用いて波高の傾向変動の有無も調べる。

2. 長期波浪推算システムの内容

(1) 海上風分布資料

外洋では、NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)より提供を受けた空間解像度約1.9°, 時間間隔6時間の表面風再解析資料を1時間間隔で線形補間したのち、北西太平洋領域に設けた格子間隔80 kmの格子網上に4点双1次補間して得た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込んで作成した海上風分布資料(畑田ら, 2005)を用いる。ここでは、これをNCEP風資料と言う。

ついで内湾・内海では、対象海域の周辺に分布して位置する多くの気象庁気象官署で得られた日最大風を含むSDP風資料と外洋境界上に設けた複数の代表地点におけるNCEP風資料の1時間間隔値から、対象海域の沿岸部と海上部の多くの風観測地点における観測相当風を入力風に対する空間補間(塩野ら, 1985)と回帰式の2段階の適用によって推定したのち、観測風を用いた山口ら(2006)の海上風分布推定法に従って作成したデータセット(山口ら, 2009c)を用いる。対象領域は①駿河湾、相模湾、東京湾とその沖合海域からなる関東沿岸海域、②伊勢湾、③豊後水道から撻灘や播磨灘・大阪湾を経て紀伊水道に至る瀬戸内海の3海域、各海域の格子間隔は2 km、期間は1961～2005年の45年である。本研究では関東沿岸海域における海上風分布資料を用いる。図-1は海

1 正会員 工博 愛媛大学教授大学院理工学研究科
2 正会員 博(工) 愛媛大学講師大学院理工学研究科
3 愛媛大学技術専門職員工学部
4 正会員 博(工) 愛媛大学契約職員工学部
5 正会員 工修 テクノシステム(株)

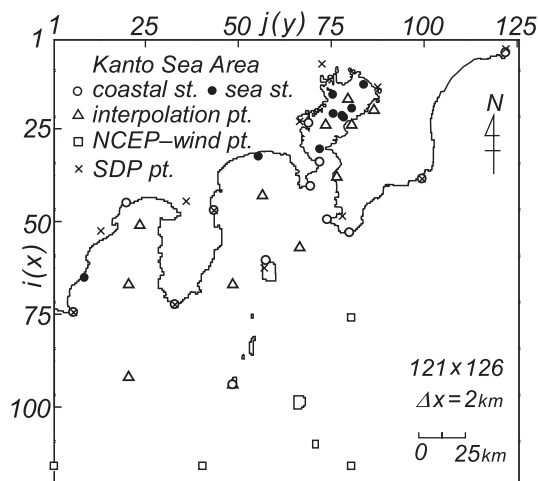


図-1 SDP風入力地点, 沿岸部と海上部の風観測地点, NCEP風入力地点および仮想地点 (関東沿岸海域)

上風分布の作成に係わるSDP風入力地点 (図中の×印), 沿岸部 (○印) と海上風 (●印) の風観測地点およびNCEP風入力地点 (□印) および作成の途中段階で補間した風を利用する仮想地点 (△印) の位置を示す。SDP風地点数は12である。

(2) 波浪推算の条件

波浪推算は図-2に示す格子間隔5 kmの北西太平洋大領域, 1 kmの関東沿岸海域, 0.1 kmの東京湾よりなる3段階高地形解像度格子網で外洋における海上風分布と関東沿岸海域における海上風分布を入力条件として1点浅海モデルにより地点別の実施する。1点浅海モデルの精度はわが国周辺の外洋部やわが国の沿岸部のみならず内

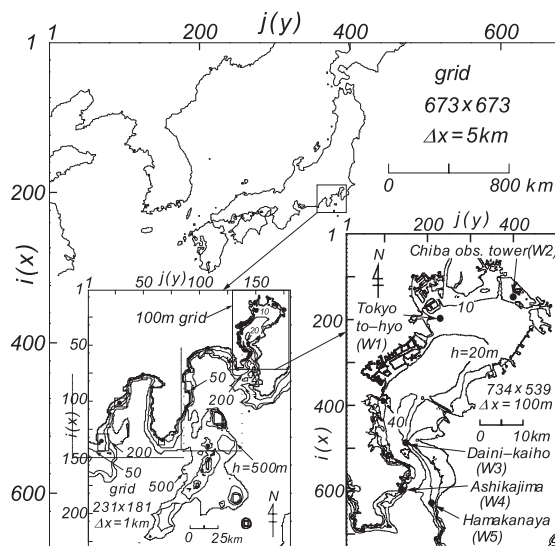


図-2 波浪推算用の3段階高地形解像度格子網と波浪推算地点

湾・内海および五大湖の1つであるErie湖における波浪観測資料との高い適合性から確認されている。

波浪推算においては, 各成分波に対する波向線上に設けた波計算点が関東沿岸海域における海上風分布の領域内にある場合およびその領域の外にある場合に, それぞれ関東沿岸海域および外洋における海上風の格子点値に4点双1次補間式を適用して, 波計算点における風特性を計算する。周波数条件として, $f = 0.05 \sim 1$ Hzを不等分割した27個, 方向条件として $0 \sim 360^\circ$ の全方向を 10° で等分割した37個を用いる。

波浪推算地点に相当する波浪観測地点および括弧内に示すそこでの水深と観測資料の期間は東京灯標 (15 m, 1983~2005年の23年間), 千葉観測塔 (10 m, 1994~2003年の10年間), 第2海堡 (16.5 m, 1991~2004年の14年間), アシカ島 (21.7 m, 1992~2004年の13年間), 浜金谷 (22.5 m, 1974~1990年の17年間) である。対象5地点のうち浜金谷における波浪観測は1990年に終了している。波浪推算の時間間隔は10分であり, 風は1時間の間不変とする。また比較のために, 外洋でNCEP風資料, 関東沿岸海域で観測風資料より推定した海上風分布をそれぞれの入力条件とした結果 (山口ら, 2009b) も用いる。

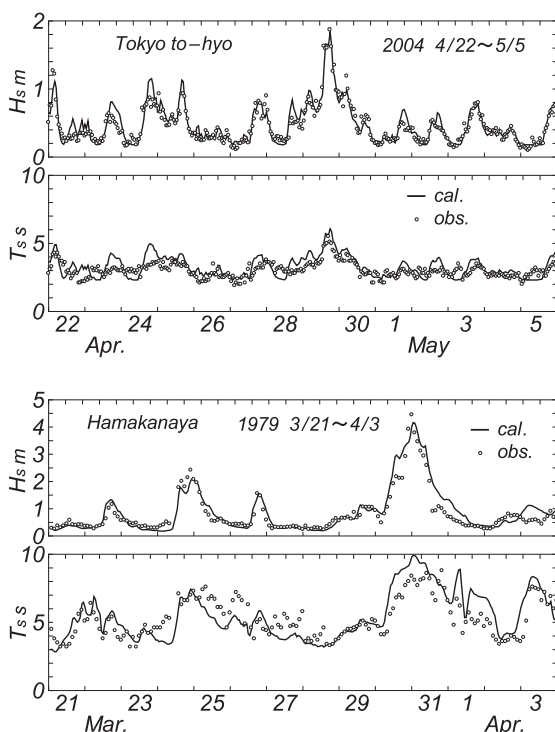


図-3 波浪時系列の比較 (東京灯標, 浜金谷)

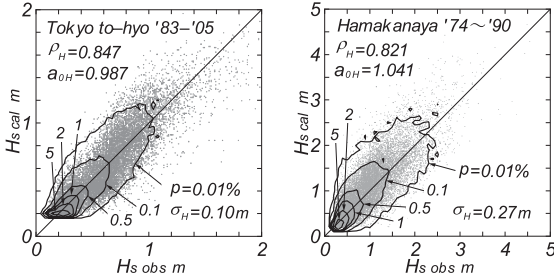


図-4 推算波高と観測波高の散布図（東京灯標，浜金谷）

3. 波浪推算結果の考察

(1) 累年波高平均値

図-3はストーム時を含む2週間の有義波高 H_s ・有義波周期 T_s の時系列に対する推算資料と観測資料の比較を東京湾最奥部の東京灯標と湾外の浜金谷についてそれぞれ別の時期に与える。波高に関して、いずれの地点でも推算値は観測値に追従して増減を繰り返す、両者はよく符合する。周期に関して、湾内波浪が卓越する東京灯標では、低波高時に相当する短周期部に対して観測値は波高の増減に応じた変化をしないことから、推算値と異なる特性を示す。外洋波浪が入射する浜金谷では、推算資料は観測資料に応じた変化を与え、両者は比較的良好に符合する。要するに、内湾における周期の観測資料には、とくに低波高時に有意な程度の誤差が含まれると推測されるので、以下では検討対象を波高に限定する。

図-4は波高に対する推算値と観測値の散布図を東京灯標（1983～2005年の23年間、1時間間隔）と浜金谷（1974～1990年の17年間、2時間間隔）について示す。推算波高は、いずれの地点においても観測波高とかなりよく対応する。この挙動は誤差指標である相関係数 ρ_H （東京灯標，浜金谷の順にそれぞれ0.847，0.821），原点を通る相関直線の勾配値 a_{0H} （0.987，1.041），2乗平均平方根誤差 σ_H （0.10 m，0.27 m）によって裏付けられる。

図-5は推算資料と観測資料より得た全観測期間中の各種波高平均値（上位1/10と1/3の波高資料の平均値 H_{s10} ， H_{s3} および全波高資料の平均値 H_{sm} と標準偏差 $H_{s\sigma}$ ）および波高誤差指標（ ρ_H ， a_{0H} ， σ_H ）を東京湾内外の5地点について示す。この場合の推算資料に基づく結果をNCEP-SDPで表す。図の縦軸の $H_{s...}$ は H_{s10} ， H_{s3} ， H_{sm} ， $H_{s\sigma}$ のいずれかに相当する。また図中には、外洋でNCEP風資料、関東沿岸海域で観測風資料に基づく海上風分布を入力条件とする山口ら（2009b）の結果（NCEP-obs）も与える。各種波高統計量に関して、いずれの推算結果もとくに内湾部の観測地点で観測結果とよく符合するのに対して、外洋からの波浪の影響が大きいアシカ島と浜金谷の2地点では観測風資料を用いる場合の推算結果（NCEP-obs）

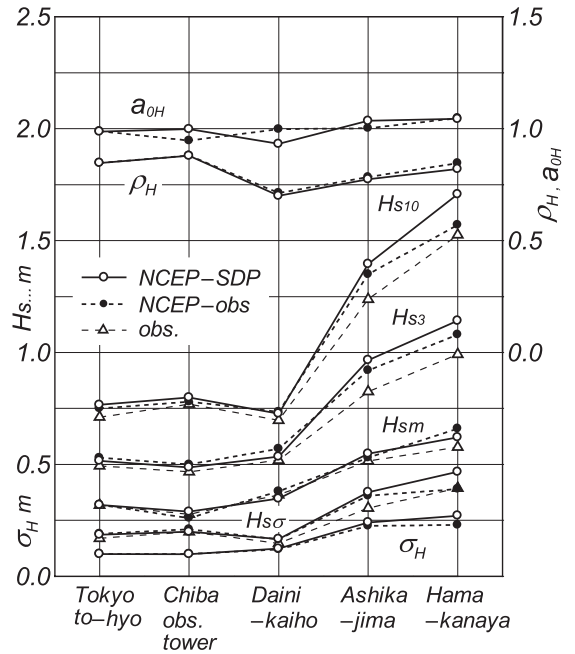


図-5 東京湾内外の5地点における累年波高平均値と誤差指標

が観測結果にやや近い値を与える。この場合、誤差指標もより1に近い ρ_H および a_{0H} と、より小さい σ_H を示すという意味で、上記の特徴を支持する。

(2) 月別波高平均値

本システムの精度をより詳しくみるために、図-6は推算資料および観測資料による各種月別波高平均値（ H_{s10} ， H_{s3} ， H_{sm} ）の経月変化と、推算資料および観測資料による各波高平均値間の散布図を東京灯標と浜金谷について示す。湾内発生波浪が卓越する東京灯標では、いずれの波高平均値に対しても推算結果は観測結果によく追従して変化しており、その挙動は誤差指標である相関係数と勾配値（たとえば、1/10最大平均波高 H_{s10} に対して $\rho(H_{s10}) = 0.911$ ， $a_0(H_{s10}) = 1.057$ ）という誤差指標によって代表される。一方、湾内発生波浪より外洋からの波浪の影響が大きい浜金谷では、推算資料に基づく各種波高平均値は観測資料に基づく結果に追従して変化するものの、高波高の月に過大な値を与える傾向にある。このため、各波高平均値に対する散布図では多くのデータが完全相関を表す45°直線よりも上側に分布し、その結果、相関係数は H_{s10} ， H_{s3} ， H_{sm} の順に0.644，0.556，0.522と1よりかなり小さく、勾配値は順に1.098，1.110，1.060と1より10%前後大きくなる。したがって、誤差指標は波浪推算の精度が必ずしも十分でないことを示唆する。浜金谷における過大評価は、外洋における入力条件の作成に用いたNCEP風資料の、6時間という時間間隔がかなり粗いことに起因するところが大いと考えられる。

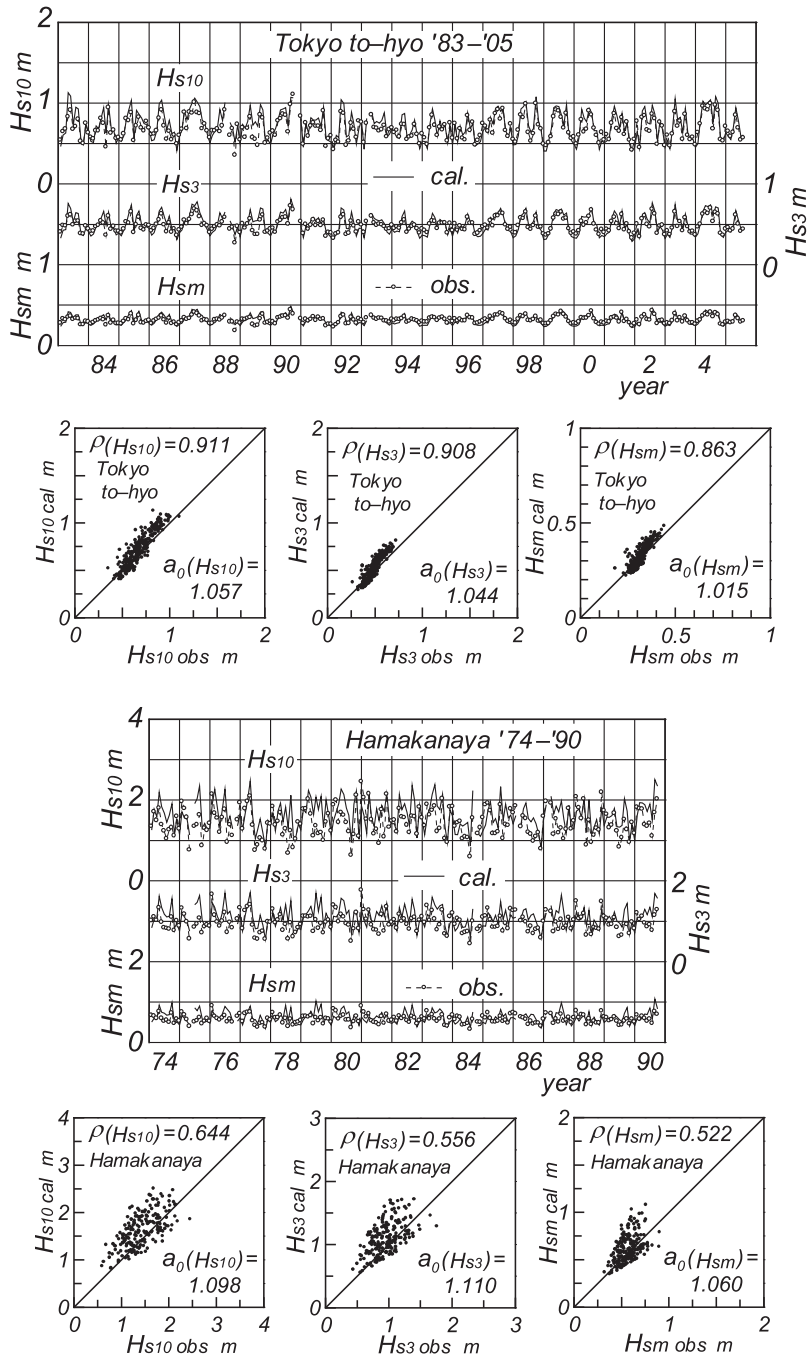


図-6 月別波高平均値の経月変化と散布図 (東京灯標, 浜金谷)

図-7は推算資料 (NCEP-SDP) に基づく月別の各波高平均値に対する誤差指標 (相関係数と勾配値) を5地点について示す。図には観測風資料を用いる場合の結果 (NCEP-obs) も与える。両推算資料に基づく結果は各地点で同程度の値をとり、勾配値でみるかぎり、観測に基づく結果とよく符合する傾向にあるが、相関係数でみる

と、推算資料と観測資料に基づく結果の間にある程度のばらつきがあることが第2海堡, アシカ島, 浜金谷の3地点で示唆される。また浜金谷では、SDP資料を用いる場合に観測資料に基づく結果との対応がやや低下する。

(3) 波高の傾向変動

45年間にわたる波浪推算資料が得られていることか

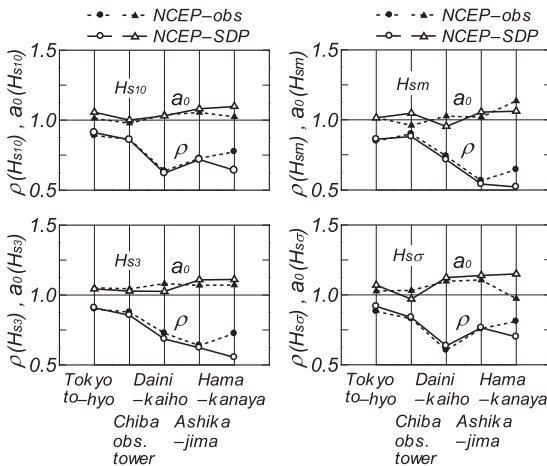


図-7 東京湾内外の5地点における月別波高平均値の誤差指標

ら、その年別平均値に対して傾向変動の統計的有意性をつぎの2つの指標、①年別平均値にあてはめた直線の勾配値 a を0とする帰無仮説に対する片側 t 検定、②鈴木(1975)のトレンド示数 I_t による検定、に基づいて調べる。この場合、有意水準を5%とし、①では正と負の有意な傾向変動が存在する場合 $L=1$ と $L=-1$ 、存在しない場合 $L=0$ で表す。②では $I_t > 1.65$ の場合に正の傾向変動あり、 $I_t < -1.65$ の場合に負の傾向変動あり、 $|I_t| < 1.65$ の場合に傾向変動なし、とする。

図-8は45年間の年別平均波高 H_{sm} の時系列を東京灯標と浜金谷について与える。波高時系列の勾配値に対する片側 t 検定の結果(東京灯標で $L=0$ 、勾配値 $a=0.007$ cm/year; 浜金谷で $L=0$ 、勾配値 $a=-0.055$ cm/year)およびトレンド示数(東京灯標で $I_t=-0.10$ 、浜金谷で $I_t=-1.21$)は統計的に有意な傾向変動の存在を示唆しない。また、これらの資料における年別1/3最大平均波高 H_{s3} に対して東京灯標で $L=0$ 、 $I_t=-1.49$ 、浜金谷で $L=0$ 、 $I_t=-0.47$ であるから、同様のことが言える。

4. 結語

本研究で得られた結果はつぎのようにまとめられる。

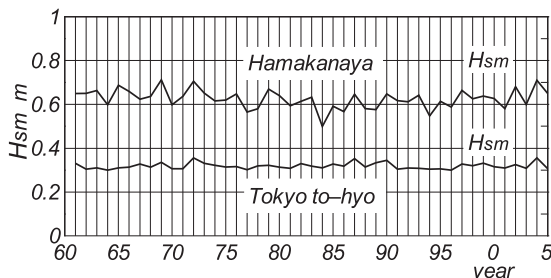


図-8 年別平均波高の年変化(東京灯標, 浜金谷)

1) NCEP風資料から求めた海上風分布を外洋における入力条件、SDP風資料から推定した海上風分布を関東沿岸海域における入力条件とした、高地形解像度条件のもとでの1点浅海モデルによる長期波浪推算は東京湾内外の5波浪観測地点における10～23年間の波浪状況を予想以上に適切に再現する。

2) 観測風資料より得た海上風分布を関東沿岸海域における入力条件とし、他の条件を同一とする同様の波浪推算と比べても、その精度は湾内地点では遜色ないし、湾外地点でも若干低い程度である。

3) 本システムの比較的高い波浪推算精度は、湾内と湾外の各1地点における45年間の年平均波高資料から統計的に有意な傾向変動が検出されないという結果の妥当性のある程度裏付ける。

最後に、貴重かつ膨大なSDP風資料および波浪観測資料を提供戴いた関係各機関に謝意を表します。

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.
- 鈴木栄一(1975): 気象統計学 (第5版), 地人書館, 314p.
- 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.
- 日野幹雄・山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一(2008): 東京湾における長期の波浪特性の推定, 水工学論文集, 第52巻, pp. 1351-1356.
- 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・大福 学・日野幹雄・畑田佳男・森 正憲・野中浩一(2006): 内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築 - 伊勢湾の場合 -, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 116-120.
- 山口正隆・日野幹雄・大福 学・畑田佳男・野中浩一(2007): 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 -, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 106-110.
- 山口正隆・大福 学・日野幹雄・野中浩一・畑田佳男(2009a): 内海・内湾における風候と確率風速の評価, 水工学論文集, 第53巻, pp. 1477-1482.
- 山口正隆・日野幹雄・畑田佳男・大福 学・野中浩一(2009b): 長期波浪推算の精度に及ぼす海上風分布資料および地形解像度の影響, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 873-878.
- 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄(2009c): 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, 海岸工学論文集, 第56巻(投稿中).