

浅海における波候に及ぼす沿岸地形の影響の検討

畑田 佳 男* ・ 山 口 正 隆**・ 大 福 学***
李 敏 杰****・ 野 中 浩 一*****

1. 緒 言

沿岸部の波浪は海底地形のみならず周辺地形の影響を受けて変化することから、地形が入り組み小島が存在する沿岸域では、波浪の規模や特性は地点ごとに大いに異なる。このため、沿岸域における沖側および岸側の複数地点で同時に得られた波浪観測資料の解析や数値モデルの適用に基づく検討が積極的に推進されてきたが、水平スケールが数十 km の範囲内で沿岸地形の影響を受けた波浪の特性をその長期特性（波候）という観点から検討した事例はあまり知られていない。これは近接する沿岸地点における長期同時波浪観測資料がほとんど存在しないことによると考えられるが、玄界灘に面する北九州沿岸では、運輸省第 4 港湾建設局や九州大学応用力学研究所により数年以上の長期波浪観測資料が複数の地点で取得されている。また、気象資料の整備、計算機性能の向上や波浪推算手法の進歩に伴い、高地形解像度格子網を用いて沿岸波浪を 20 年にわたり推算することも可能になっている（畑田ら, 2000）。

そこで本研究では、玄界灘沿岸の 4 地点における波浪の長期観測資料の解析に基づいて波候に及ぼす周辺地形の影響を調査するとともに、波浪の長期推算（畑田ら, 2000）が沿岸部の近接地点における波候の変化を再現しているかどうかを検討する。

2. 波浪資料と解析方法

（1）観 測 資 料

解析には運輸省第 4 港湾建設局による玄界灘水深 45 m 地点、玄界灘水深 28 m 地点、藍島水深 21 m 地点における 2 時間ごとの波浪観測資料（沿岸開発技術センター, 1993-1999；沿岸開発技術センター, 1996）、および九州大学応用力学研究所による津屋崎水深 15 m 地点における 1 時間ごとの波浪観測資料（草場ら, 1992；Masuda

ら, 1999）を使用する。ただし、以下では簡単のため、これら 4 地点をそれぞれ玄界灘 45 m 地点、玄界灘 28 m 地点、藍島、津屋崎と呼ぶ。資料期間は、玄界灘 45 m 地点で 4 年間（1985～1988 年）のほかいずれの地点でも 10 年間（1989～1998 年）である。また玄界灘 45 m 地点と 28 m 地点では、それぞれの期間に対して平均波向資料が、玄界灘 45 m 地点（1986～1987 年）と津屋崎（1989～1998 年）では、それぞれ風資料が得られている。ただし、玄界灘 45 m 地点における 1985～1986 年の波向観測資料には明らかな異常特性が見出されることから、残りの資料期間である 1987～1988 年の平均的波向特性と合致させるように補正を行った。

4 観測地点の位置は後出の図-1 に示す。玄界灘 28 m 地点からみれば、玄界灘 45 m 地点は南西約 20 km、藍島は東方約 30 km、津屋崎は南方約 20 km に位置する。対岸距離は玄界灘 45 m 地点と 28 m 地点では N～NE で、藍島では NNW～N の間の狭い範囲で 700 km 以上に達するが、津屋崎を含む 4 地点とも WSW～NNW では 300 km 以下であり、他の方向は対岸距離が数 km 以下の

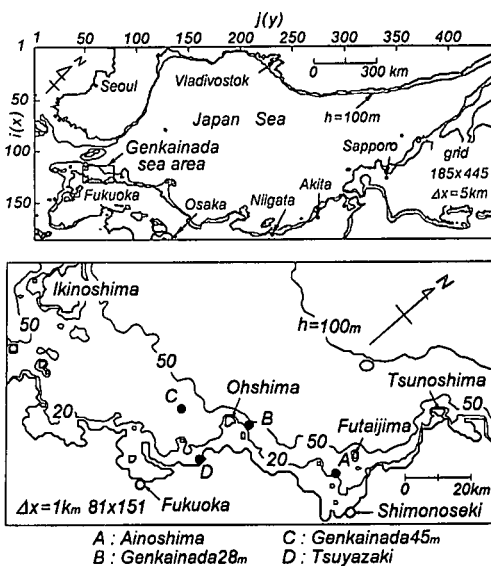


図-1 波浪推算で使用する大領域・小領域水深格子網

* 正 会 員 工 修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科
** 正 会 員 工 博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科
*** 正 会 員 工 修 愛媛大学技官 工学部環境建設工学科
**** 正 会 員 工 修 愛媛大学外国人客員研究員 工学部環境建設工学科
***** 学生会員 工 修 愛媛大学大学院理工学研究科

陸地に対応する。とくに、藍島では蓋井島や下関付近の沿岸地形、津屋崎では宗像大島や津屋崎鼻によりN寄りの波が遮蔽される。また、外海に向けて開いた玄界灘45m地点と28m地点における方向別対岸距離はそれぞれ相互に類似する。藍島では方向別対岸距離はNNW~Nの間で700km以上となるのに対して、津屋崎ではこの方向が遮蔽されているが、NNW~WSW方向において両地点は似た方向別対岸距離をもつ。

(2) 推算資料

長期間にわたる沿岸波浪の推算を行うことを念頭において、波浪推算には計算時間が比較的短く、しかも地形解像度が高い水深格子网上的計算によって良好な推算精度が得られる1点浅海モデル(山口ら, 1987)を使用する。波浪推算は、図-1に示すように、陸地地形や海底地形を精度良く再現するため、x軸をN方向から反時計方向に45°回転した日本海全域を格子間隔 $\Delta x=5$ kmで 185×445 に分割した大領域水深格子網に、推算点周辺領域を格子間隔1kmで 81×151 に分割した小領域水深格子網を組み込んだ高地形解像度2段階水深格子網において行う。計算に用いる周波数データの個数は、 $f=0.055 \sim 0.75$ Hz間を不等分割した25個、方向データの個数は各波浪推算点に到達する波浪の方向範囲を等分割した37個である。境界条件は、日本海がすべて陸地境界で囲まれていると仮定して、波浪推算点より出発し計算領域境界に達する波向線先端で、方向スペクトルを0とすることにより与える。

海上風資料はEuropean Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF; ヨーロッパ中期気象予報センター)より提供を受けた1979~1998年の20年に及ぶ6時間間隔の10m高度表面風解析値資料を再編集したもの(畑田ら, 2000)である。ECMWF風資料の原資料は1991年9月16日以前では空間解像度 1.125° 、9月17日以降では空間解像度 0.5625° として得られていることから、原資料を日本海領域に設けたNW方向をx軸、NE方向をy軸とする格子間隔40kmの格子網上に補間することにより波浪推算用海上風資料を作成する。すなわち、日本海直交格子網上格子点の緯度・経度座標を、直交座標と緯度・経度座標変換数値表を用いて補間したのち、各格子点位置の風速成分を緯度・経度座標表示のECMWF風成分に対する2次元1次補間式の適用によって推定し、この補間結果を45°反時計方向に回転させる。ECMWF風資料は陸地地形の影響を受ける沿岸部で風速がかなり小さいという特性をもつので、朝鮮半島と日本本土の間に位置する玄界灘・対馬海峡海域では、南西に向かうほど増加する係数を乗じてECMWF風速を補正する。また、1991年9月17日0時を境とする空間解像度の変化に対応するため、期間別の風速補正も行う。

波浪推算は玄界灘45m地点、玄界灘28m地点、藍島および津屋崎において、それぞれ時間に関する線形補間を通じて1時間ごとに格子点で算出した海上風を各成分波に対する波向線上の格子点に再び2次元1次補間して得た海上風を入力条件とすることによって、1979~1998年の20年間にわたり計算時間間隔1時間で実施し、波候解析には各地点の観測期間に対応する波浪推算資料を用いる。

(3) 波候解析の方法

2時間あるいは1時間間隔の観測・推算波浪時系列資料から、各1年間および観測期間全体の月・季節・年単位で各種波候統計量を求める。波候統計量は前者の期間では波高・周期の平均値と標準偏差や高波出現率であり、後者の期間では波高・周期の階級別出現率、相関出現率や波高の方向別出現率である。観測資料間および推算資料間の差統計量や、推算資料と観測資料間の誤差統計量として、特別値や月別値の各資料に対する相関係数、相関図において原点を通る相関直線の勾配値のほか、特別値資料に対して2乗平均差や2乗平均誤差を計算する。風資料についても同様の解析を行う。

3. 波候に及ぼす沿岸地形の影響

(1) 観測資料に基づく波候

図-2は玄界灘28m地点と藍島、および玄界灘28m地点と津屋崎における累月平均波高 $\bar{H}$ 、周期 $\bar{T}$ と2m以上の高波出現率 p_H の経月変化を示す。日本海西南端に位置する3地点の波候は、冬季に高波が出現し夏季に静

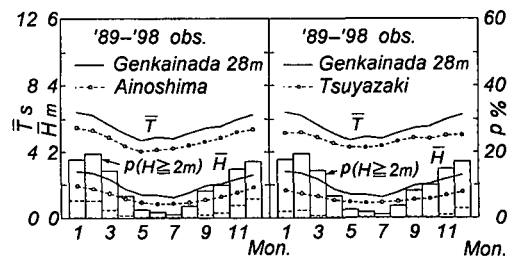


図-2 累月波候統計量の経月変化(観測資料)

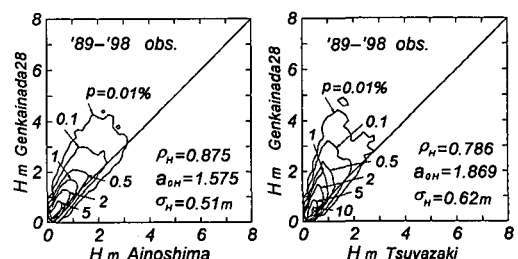


図-3 特別波高の相関(観測資料)

穏な海況が持続する日本海特有のU字型季節変化をとるが、藍島の波浪規模は藍井島や下関付近の沿岸地形の遮蔽効果により、玄界灘28m地点に比べて波高で30%、周期で15%、高波出現率で60%以上小さくなり、その傾向はN寄りの波浪が卓越する冬季と秋季に著しい。宗像大島や津屋崎岬の遮蔽効果を受ける津屋崎の波候も藍島と同様の特徴を有するが、春季と夏季の波浪は藍島と同程度で冬季と秋季の波浪は藍島よりさらに低い値をとることから、全体として津屋崎の波候の季節変化は小さい。

図-3は玄界灘28m地点と藍島、および玄界灘28m地点と津屋崎の2時間ごとの波高資料の相関を等値線分布として表わす。岸側に位置する藍島および津屋崎における波高は、沖側に位置する玄界灘28m地点より小さく、とくに高波浪時ほど等値線幅が拡大する。これは藍島および津屋崎では冬季のN寄りの高波浪が周辺地形によって遮蔽されることによると推測される。また、相関係数 ρ_H や原点を通る相関直線の勾配値 a_{0H} および2乗平均波高差 σ_H の数値から明らかなように、藍島の遮蔽度が津屋崎より低いことから、藍島の波高は津屋崎の波高より玄界灘28m地点の波高と高い相関をもち、しかも大きい。表-1は4地点における波高および周期の平均値と標準偏差($\bar{H}_m$, H_{σ} , $\bar{T}_s$, T_{σ})の一覧を観測資料および推算資料について示したものであり、記号 r は測得率、各欄の1段目は観測資料を用いた結果、cal.1は観測資料に対応する推算資料を用いた結果、cal.2は観測期間全体にわたる推算資料を用いた結果を表す。観測資料によれば、玄界灘28m地点の波高・周期は、沿岸部に位置し周辺地形の影響をより強く受ける藍島や津屋崎に比べてかなり大きいし、沿岸部では藍島の波浪が津屋崎を上まわる。また、玄界灘45m地点の波高が玄界灘28m地点より小さいのは測得率の相違、すなわち高波浪時

おけるより高い頻度の欠測によるものである。

(2) 推算資料に基づく波候

図-4は玄界灘28m地点、藍島および津屋崎における観測・推算波高時系列を1991年2月について与えたものであり、3地点における推算資料と観測資料はそれぞれ良好な対応を示す。また、波高はいずれの時点においても玄界灘28m地点、藍島、津屋崎の順に低い値をとるが、経時変化はきわめて類似する。しかし、2月における平均的な推算波向は玄界灘28m地点ではN~NW、

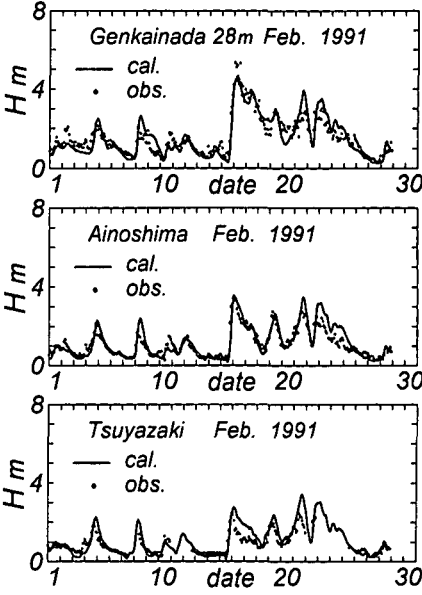


図-4 波高時系列の比較

表-1 波高・周期の平均値と標準偏差

location (depth m)	$\bar{H}_m$	H_{σ}	$\bar{T}_s$	T_{σ}	r
Genkainada (45)	0.91	0.65	5.4	1.5	0.87*
	0.93	0.69	5.5	1.3	cal.1*
	1.10	0.80	5.7	1.3	cal.2
Genkainada (28)	1.01	0.70	5.5	1.5	0.94
	1.03	0.77	5.6	1.3	cal.1
	1.02	0.77	5.6	1.3	cal.2
Ainosima (21)	0.66	0.47	4.8	1.3	0.95
	0.65	0.57	4.8	1.1	cal.1
	0.65	0.57	4.7	1.1	cal.2
Tsuyazaki (15)	0.60	0.35	4.7	1.0	0.91
	0.62	0.47	4.7	1.3	cal.1
	0.62	0.47	4.7	1.3	cal.2

r : ratio (=obs. run/total run) * : 1985-1988
cal. 1 : obs. period cal. 2 : 1989-1998

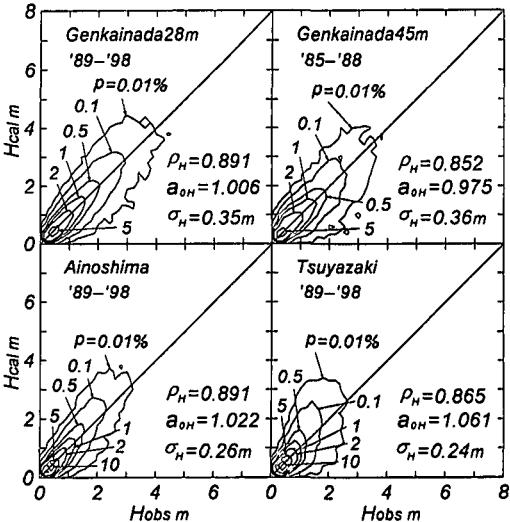


図-5 時別波高の比較

藍島ではN~NNE, 津屋崎ではNW~WNWであり, 各地点の方向別対岸距離の特性, すなわち遮蔽効果の相違に依じてかなり異なる。

図-5は4地点における時別波高の推算値と観測値の相関を等値線分布として表したものである。この場合の推算資料と観測資料の相関係数 ρ_H , 原点を通る相関直線の勾配値 a_{0H} と2乗平均波高誤差 σ_H は, 玄界灘28m地点で(0.891, 1.006, 0.35 m), 45m地点で(0.852, 0.975, 0.36 m), 藍島で(0.891, 1.022, 0.26 m), 津屋崎で(0.865, 1.061, 0.24 m)であるから, 津屋崎や藍島で推算波高が高波浪時ほど観測波高より若干大きくなる傾向を除いて, 推算精度はかなり高い。この結果は表-1の各欄における波高・周期の平均値や標準偏差の数値的対応によっても裏付けられる。また, 図-6は4地点における推算資料と観測資料に基づく累月波候統計量(ただし, 津屋崎および藍島では1m以上の高波出現率)の経月変化図である。推算資料に基づく各波候統計量は細部の隔たりを除けば, 観測資料に基づく結果と全般的によく符合し, 特定の偏りを示さない。以上のことから, 推算資料によっても異なる地点間の波高・周期に関する波候の相違を定量的に検討できるといえる。

図-7は推算資料および観測資料から得た玄界灘2地点における波高2m以上の方向別高波出現率, および玄界灘45m地点と津屋崎における風速10m/s以上の方向別強風出現率を一括して与えたものである。玄界灘45m地点では, 高波の卓越方向はNNEであって, 推算資料と観測資料は分布形状を含めて比較的良好に符合するが, 玄界灘28m地点では, 推算資料は観測資料より1方位時計方向にずれた波向分布を与える。方向別強風出現率図によれば, 観測資料における強風の卓越方向は玄界灘45m地点でNEとWNW, 津屋崎でNNEとWで

あって, ECMWF 風資料に基づく結果とも比較的良好に符合することや, ECMWF 風資料もN方向を強風の卓越方向としないことを併せて考慮すると, 玄界灘28m地点における観測波向には, 反時計回りに1方位程度の誤差が含まれる可能性が示唆される。

つぎに, 推算資料を用いて, 沖側地点で沿岸方向に約20 km離れた玄海灘28m地点と45m地点, および同じ沿岸域の沖側と岸側に位置する玄界灘45m地点と津屋崎における波候特性を検討する。図-8はそれぞれの2地点における時別波高資料の相関図, および図-9は累

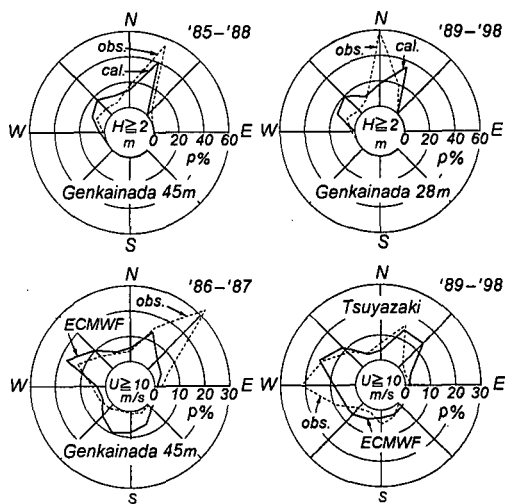


図-7 方向別高波・強風出現率の比較

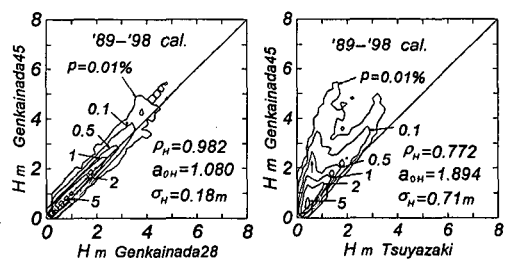


図-8 時別波高の相関 (推算資料)

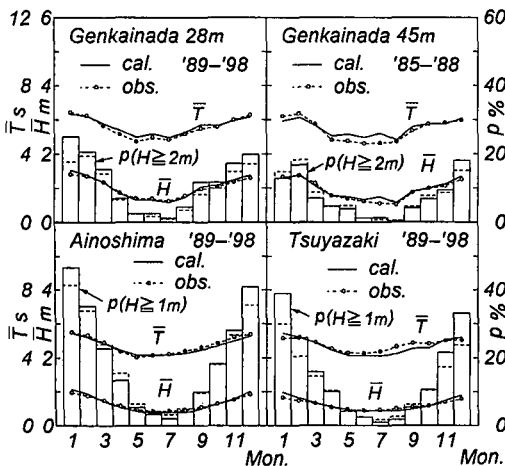


図-6 累月波候統計量の比較

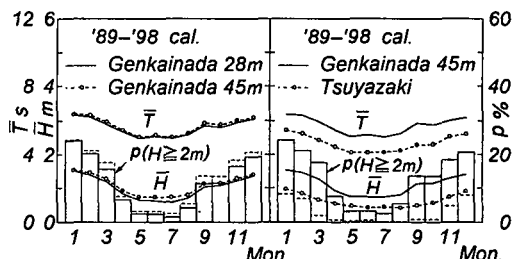


図-9 累月波候統計量 (推算資料)

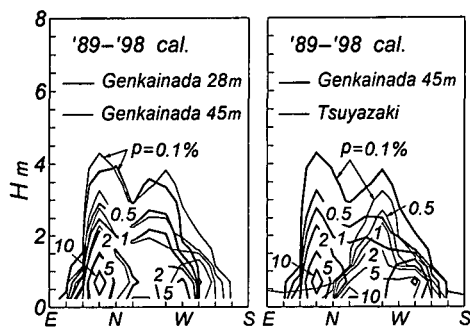


図-10 方向別波高出現率 (推算資料)

月波候統計量の経月変化図を示したものである。玄界灘 45 m 地点の波浪は玄界灘 28 m 地点に比べて高波浪時ほど若干大きくなり、しかも表-1 の cal. 2 の段に示すように、平均波高で 8%、平均周期で約 2% 大きい値をとるけれども、波高の相関が非常に高いことから、玄界灘両地点における波候はきわめて類似する。したがって、累月波候統計量も玄界灘 28 m 地点の波浪規模が小さい点を除いて、同様の経月変化を与える。また、玄界灘 45 m 地点における波高は津屋崎よりかなり大きく、しかも等値線形状は高波浪時ほど広がり、2 つに分離する傾向を示す。表-1 の cal. 2 の段の結果および経月変化図によれば、津屋崎の波浪の規模は玄界灘 45 m 地点に比べて平均波高で約 60%、平均周期で約 80% と小さいが、その割合は両地点における波候統計量が平行して図示されるように、あまり月に依存しない。

図-10 は玄界灘 2 地点、および玄界灘 45 m 地点と津屋崎における方向別波高出現率の等値線分布を示す。玄界灘 2 地点における方向別波高出現率はきわめて類似し、主卓越波向も NW をとる。しかし W 寄りの卓越波向に関しては、両地点で相違がみられ、玄界灘 45 m 地点では、玄界灘 28 m 地点で現れない SW 方向の波浪が生起する。これは図-1 でみるように、玄界灘 45 m 地点が壱岐水道を通して W~SW 方向に数百 km の対岸距離をもつものに対して、玄界灘 28 m 地点の方向別対岸距離はおおむね 10 km 以下となっているという両地点における W~SW 方向の対岸距離の相違に起因する。また、玄界灘 45 m 地点と津屋崎の波高は NW~W 方向に関して同程度の規模と出現特性をもつが、津屋崎では N 寄

の波浪が遮蔽されることから、玄界灘 45 m 地点で卓越する NNE~N 方向成分の波浪が出現しない。この結果、図-8 の波高相関図において等値線形状が 2 つに分離する特性を有することになる。以上の特性は観測資料に基づく図-3 の玄界灘 28 m 地点と津屋崎における波高相関図においても現れている。

4. 結 語

本研究では、玄界灘沿岸 4 地点における長期波浪観測資料の解析に基づいて、周辺地形が沿岸部の波候に大きく影響し、その結果、波浪の規模の減少と波候の方向別出現特性の変化が現れることを例証するとともに、ECMWF 風資料を入力条件とする高地形解像度水深格子網上で 1 点浅海モデルによる長期波浪推算が沿岸部の近接地点における波候の変化を定量的に再現しうことを明らかにした。また、玄界灘 28 m 地点における波向観測資料には、反時計回りに 1 方位程度の誤差が含まれる可能性があることを示唆した。

最後に、風・波浪観測時系列資料を提供戴いた運輸省第 4 港湾建設局下関調査設計事務所および九州大学応用力学研究所草場忠男助教授と、NOWPHAS 波浪観測資料を使用させて戴いた沿岸開発技術センターならびに表面風解析値資料を提供戴いた ECMWF に謝意を表します。

参 考 文 献

- 沿岸開発技術センター (1993-1999): 全国港湾海洋波浪観測資料, NOWPHAS 1991, 825 p., 1992, 836 p., 1993, 861 p., 1994, 861 p., 1995, 912 p., 1996, 977 p., 1997, 1071 p., 1998, 667 p.
- 沿岸開発技術センター (1996): 全国港湾海洋波浪観測 25 年統計資料, NOWPHAS 1970-1994, 640 p.
- 草場忠夫・丸林賢次・石橋道芳 (1992): 津屋崎沖の波と風—海上観測ステーション 1990 (1)—, 九州大学応用力学研究所所報, 74 号, pp. 45-58.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・李 敏杰・野中浩一 (2000): 波浪の長期推算に基づく波候と波高極値の推定システム, 自然災害科学 J. JSNDS, 19-1, pp. 69-85.
- 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.
- Masuda, A., T. Kusaba, K. Marubayashi and M. Ishibashi (1999): Statistics of wind and waves off Tsuyazaki, Fukuoka, in the Eastern Tsushima Strait, J. Oceanogr., Vol. 55, pp. 289-305.