

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—

山口正隆¹・大福 学²・日野幹雄³
畑田佳男⁴・森 正憲⁵・野中浩一⁶

伊勢湾を対象として、沿岸部と海上部で取得された風観測資料を用いて 1 時間ごとの海上風分布のデータセットを 9 年間にわたり作成し、その平均特性を調べるとともに、これと 1 点浅海モデルおよび波候解析モデルを組み合わせた波浪の長期推算システムを構築し、その精度を検討した。この結果、1) 伊勢湾では湾奥から湾外に向けて平均風速が増大するが、夏季には SE 方向、それ以外の季節では NW 方向の風が卓越し、湾軸が風の通り道になっていること、2) 本システムによる外洋性波浪資料は ECMWF - WAM 解析資料より高い精度をもつことや、本システムは伊勢湾内外の観測地点の波浪に対して良好な再現能力を有すること、を明らかにした。

1. 緒 言

内湾・内海における波浪を高い精度で推定するために最も重要な点は周辺地形の影響を受けた海上風を的確に推定することであり、観測風の空間補間による海上風推定法(山口ら, 1981)は適正な観測資料が得られる場合には簡便で有力な方法と考えられる。

わが国の内湾・内海のうち、伊勢湾では沿岸部のみならず海上部の多くの地点で、長期にわたり風観測資料が取得されていることから、これらを用いることによって、長期の海上風分布を推定することが可能になる。また、波浪観測資料も湾内外の多くの地点で得られている。

そこで本研究では、内湾・内海における長期の波浪を高い精度で推定する波浪推算システムの構築を目標に、伊勢湾内外の多数地点における風観測資料を用いて 9 年間相当分の海上風分布を推定し、その特性を調べるとともに、この海上風分布を逐次入力条件とした 1 点浅海モデル(山口ら, 1987)による高地形解像度波浪推算と波候解析からなる波浪の長期推算システムを地点別に適用し、まず外洋地点で波浪観測資料および ECMWF 提供の波浪解析資料(ECMWF-WAM 資料)との比較に基づいて、本システムの相対的な精度を明らかにする。ついで、湾内外の多数地点における波浪観測資料との比較に基づいて本システムの精度を包括的に検証する。なお、伊勢湾における長期波浪推算の事例には、期間を 2001 年度の 1 年とする大澤ら(2004)の研究などがある。

2. 海上風分布の推定法と特性

(1) 海上風分布の推定法

伊勢湾内外では、図-1 に示すように沿岸部のみならず海上部に広範囲に位置する多くの地点で 1~2 時間間隔の定時風観測資料(10 分間平均風速と風向)が長期にわたり取得されており、しかもそれらは電子データの形で保存されている。しかし、全対象期間について観測資料が揃っている地点は多くないし、しかも個々の地点における観測資料は欠測を含んでいる。そこで、各地点の風資料はまず 2~3 時刻の欠測部を前後の風資料の線形補間により補充し、ついで隣接地点の風資料との高い相関を利用して、その欠測部を補うことにより完全資料としたのち、1/7 乗則を用いて 10 m 高度風速に、さらに観測状況や累年平均風速を考慮して地点ごとに決めた係数(1.0~1.25)を乗じて海上風速に変換する。風向に対する高度補正・海上風補正は行わない。また、風観測資料の補充を適正に行えない場合、とくに外洋のブイ A 地点において ECMWF 風に台風モデル風を組込んだ風資料(畑田ら, 2005)を用いる。

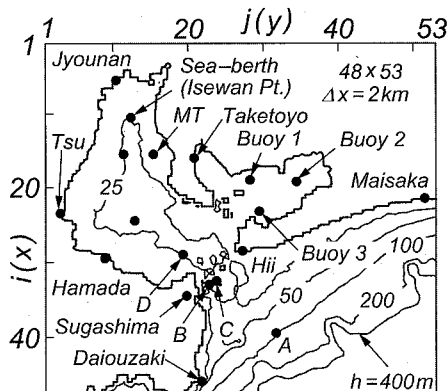


図-1 海上風推算領域と風観測地点の位置

1 正 会 員 工 博 愛媛大学大学院理工学研究科教授
2 愛媛大学技術専門職員
3 (株)テクノシステム 専務取締役
4 正 会 員 博(工) 愛媛大学大学院理工学研究科講師
5 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科
6 正 会 員 博(工) 愛媛大学契約職員

海上風分布はつぎの順序で推定する。

①伊勢湾の中央部に沿って風速が増幅されるように、MT 局西側海上部の 1 地点および MT 局と浜田の中間海上部 1 地点を仮想地点（図-1）として設け、沿岸部 8 地点と海上部 8 地点の計 16 地点の観測風資料に対する加重 1 次補間法（塩野ほか，1985）の適用により，そこでの風を 1995～2003 年の 9 年間について 1 時間ごとに計算し，この平均値と MT 局やブイ D 地点における期間平均風速の比を考慮して増幅係数（両地点とも 1.1）を定める。

②この増幅係数をそれぞれ乗じて仮想 2 地点における最終的な風資料としたうえで，合計 18 地点の風資料に対する加重 1 次補間法の適用によって，伊勢湾に設けた格子間隔 2 km の格子網（図-1）上の風を 1 時間ごとに 1995～2003 年の 9 年間にわたり計算し，データセット化をはかる。時点数は 78,888 である。

（2）海上風分布の特性

図-2 は 9 年間の資料から得た季節別平均風速・風向の平面分布を冬季と夏季について示す。伊勢湾では，夏季を除いて NW 方向の風が卓越し，平均風速 U_m は湾奥から湾外の外洋に向けて 2 倍程度に増大する。逆に，夏季には卓越風向は SE 方向をとるが，風速は湾内から

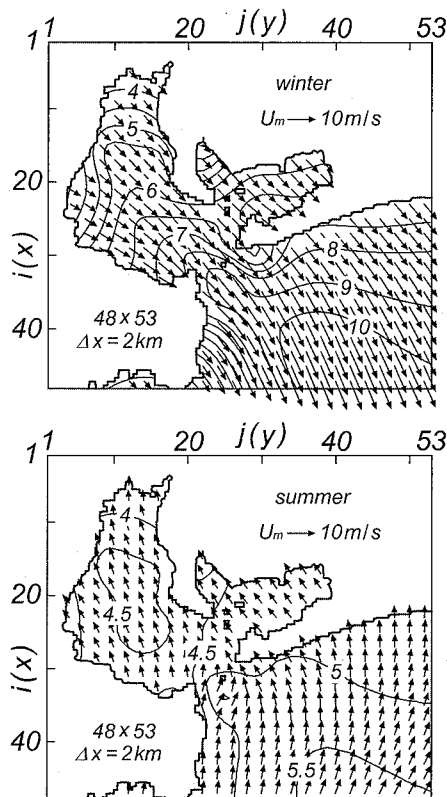


図-2 冬季と夏季における平均風速・風向分布

湾外に向けて大きくなる（30～40％）という挙動は類似する。つまり，季節によらず伊勢湾の湾軸はほぼ風の通り道になっている。また，冬季と夏季の平均風速の比較は，湾外から湾奥に向かうほど，平均風速の季節変化（年較差）が小さくなる挙動を示唆する。なお，2001 年度の平均風速の平面分布はメソ気象モデル MM5 を用いて得られた結果（大澤ら，2004）と全般的にかなりよく符合する。

3. 波浪推算の方法と資料解析の方法

波浪推算には，高地形解像度計算に容易に対応でき，しかも推算精度が高い 1 点浅海モデルを用いる。計算領域は格子間隔 5 km で 673×673 に分割した北西太平洋大領域に格子間隔 1 km で 129×181 に分割した伊勢湾周辺小領域あるいは 0.1 km で 1297×1926 に分割した伊勢湾周辺小領域を組込んだ 2 段階高地形解像度格子網からなる。波浪推算地点はその位置を図-1 あるいは図-3 に示すブイ A, B, C, D 地点，浜田，MT 局，伊勢湾地点，シーバース，四日市，城南の 10 地点である。これらは湾外から湾奥に至る広い範囲に分布する。波浪推算の期間は 1995～2003 年の 9 年，時間間隔は 30 分（1 km 格子網，ブイ A, B, C 地点），あるいは 10 分（0.1 km 格子網，ブイ D 地点以北の湾内地点）とする。地形解像度の異なる小領域格子網の使用は計算時間と湾内地点の波浪推算に必要な地形解像度の両者を勘案した結果である。周波数データは外洋に面したブイ A, B, C 地点では 0.04～0.5 Hz 間の 23 個，湾内地点では 0.05～1 Hz 間の 27 個，方向データは 0～360° 間の 37 個とする。海上風は，外洋大領域では ECMWF 風に台風モデル風を組込んだ風（畑田ら，2005）を 80 km 格

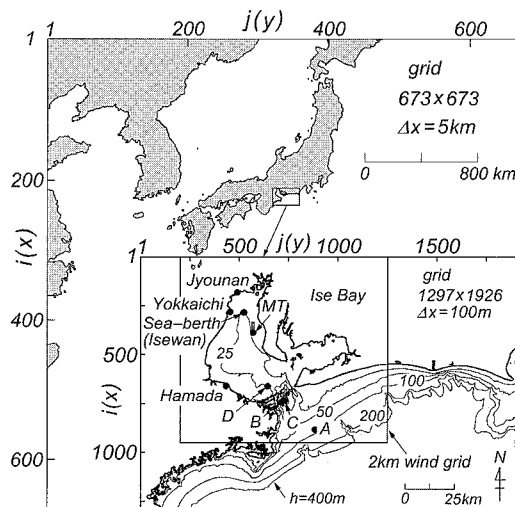


図-3 波浪推算用 2 段階格子網と波浪推算地点

子網で、伊勢湾小領域では風観測資料より補間した風を 2 km 格子網で 1 時間ごとに与える。

波候解析では、波高 H_s ・周期 T_s の推算および観測時系列資料から 1 年単位および資料期間全体で月・季節・年についての各種平均値 (波候統計量)、および推算資料と観測資料の時別値や波候統計量の間の相関係数 ρ 、両者の相関図において原点を通る直線の勾配値 a_0 、2 乗平均平方根誤差 σ よりなる誤差指標を求める。

4. 波浪推算精度の検討

(1) ECMWF-WAM 資料との比較

これは ECMWF が表面風解析資料を入力条件とする WAM cycle4 によって計算した波浪資料と波浪観測資料を同化して作成した 6 時間間隔、空間解像度 0.5° の波浪解析資料 (1997~2002 年の 6 年間) のうち、有義波高と平均周期の各資料である。平均周期は周波数スペクトルの負の 1 次積率を用いて計算されていることから、有義波周期に等しいとする。比較に使用する波浪資料の抽出点は外洋に面し沿岸地形の影響が少ないブイ A 地点 ($34^\circ 22' 20''\text{N}$, $137^\circ 07' 40''\text{E}$) に最も近い格子点 ($34^\circ 30'\text{N}$, $137^\circ 00'\text{E}$) であり、西隣りと北隣りの各格子点は陸地に相当する。

図-4 は 1 ヶ月間の有義波高および有義波周期の時系列に対する比較例を示す。いずれの波浪資料も観測資料の経時変化に忠実に追従しており、波高に関して観測資料とよく符合するが、1 点モデル (SPM) 資料はストーム時において WAM 資料より観測資料に近い値を与える。周期についても、1 点モデル資料は観測資料の経時変化によく追従するのに対して、WAM 資料はその経時変化が緩やかで観測資料に追従せず、観測資料より大きい値をとる。

表-1 は観測資料 (測得率 $r=0.775$) および両波浪資

表-1 累年波候統計量および誤差指標

para.	obs.	SPM	WAM
H_{sm} m	1.29	1.25	1.22
H_{s3} m	2.06	2.40	1.79
H_{s10} m	2.95	2.98	2.04
T_{sm} s	6.5	6.5	7.9
T_{s3} s	8.5	8.1	9.8
T_{s10} s	10.3	9.4	11.1

index	model	H_s	T_s
ρ	SPM	0.848	0.739
	WAM	0.842	0.507
a_0	SPM	0.94	0.97
	WAM	0.87	1.16
σ	SPM	0.41 m	1.2 s
	WAM	0.40 m	2.2 s

表-2 月別波候統計量の誤差指標

para.	SPM		WAM	
	ρ	a_0	ρ	a_0
H_{sm}	0.875	0.98	0.888	0.92
H_{s3}	0.906	1.01	0.893	0.82
H_{s10}	0.893	1.02	0.874	0.77
T_{sm}	0.891	0.99	0.544	1.19
T_{s3}	0.899	0.94	0.544	1.10
T_{s10}	0.861	0.92	0.599	1.05

料より得た累年の波候統計量および誤差指標の一覧を、表-2 は月別波候統計量の誤差指標の一覧を示す。ここに、添字 ' m ' は平均値、' 3 ' と ' 10 ' はそれぞれ資料の上位 1/3 および 1/10 の平均値を表す。また、1 点モデル資料と WAM 資料の間で、より高い精度を表す指標を太字にしている。これらの表によると、大部分の波候統計量および誤差指標は 1 点モデル資料が WAM 資料より高い精度を、とくに高波高部や周期に関してもつことを示唆する。

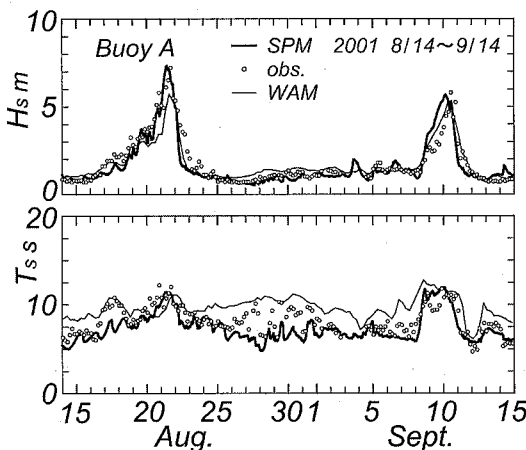


図-4 波浪時系列の比較例 (ブイ A 地点)

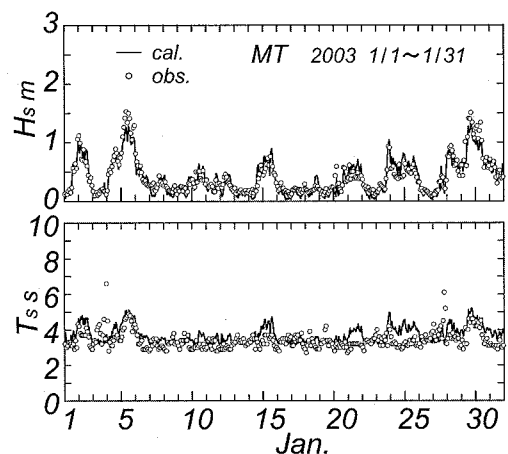


図-5 波浪時系列の比較例 (MT 局)

(2) 湾内外地点の観測資料との比較

推算資料と観測資料の比較例として、図-5はMT局における波浪時系列を示す。推算波高は日単位で急激に増減する観測波高に追従して変化しており、その精度はかなり高い。しかし、観測波高に最低値が存在するようであり、低波高時には推算波高は観測波高より小さい傾向にある。この特徴はMT局以北の地点で共通してみられる。一方、推算周期は推算波高に連動した変化を繰り返すのに対して、観測周期は細かい変動と突出値を含むことから、両者があまり対応しない。要するに、MT局以北の観測地点における周期資料は四日市における資料を除いて検証用資料として有用とは言えない。

図-6はブイA地点とMT局における特別波高資料の散布図を例示する。個々のプロット点のばらつきや等値線および誤差指標（相関係数 $\rho_H=0.839$, 0.879 , 勾配値 $a_{0H}=0.96$, 1.03 , 2乗平均誤差 $\sigma_H=0.43$ m, 0.10 m）が示すように、推算波高と観測波高の対応はかなり良好である。ただし、MT局では、推算波高が観測波高と比べて低波部と高波高部でやや小さく、中間波高部でやや大きい傾向が現れている。

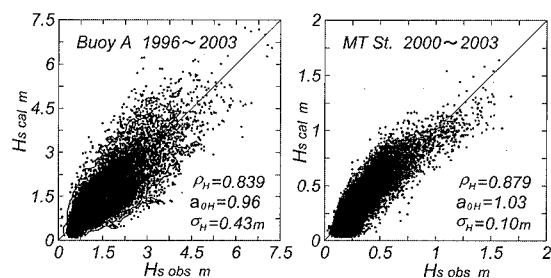


図-6 推算波高資料と観測波高資料の散布図

表-3は全観測地点における累年波高・周期統計量と誤差指標の一覧を示す。シーバースでは、波高資料のみが得られている。また、スペースの関係上、観測期間と測得率は表-4に与える。各欄の数値は波高に対する推算精度が湾外～湾奥の各地点で高いことを表す。周期についても、湾外のブイA地点をはじめ外洋波浪の影響を受ける浜田に至る地点や湾奥の四日市で、比較的良好な再現性がみられる。しかし、MT局、伊勢湾地点、城

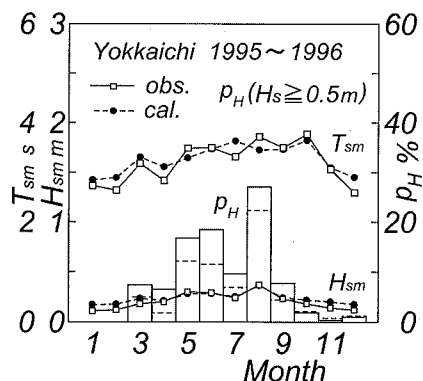


図-7 累月平均波高・周期・高波出現率の比較例(四日市)

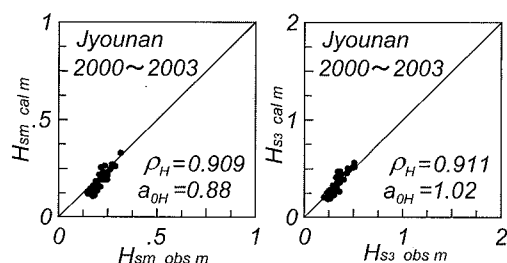


図-8 月別波高統計量の比較例(城南)

表-3 累年波候統計量および誤差指標(全観測地点)

location	H_{sm} m		H_{s3} m		ρ_H	a_{0H}	σ_H m	T_{sm} s		H_{s3} s		ρ_T	a_{0T}	σ_T s
	obs.	cal.	obs.	cal.				obs.	cal.	obs.	cal.			
Buoy A	1.31	1.29	2.09	2.10	0.839	0.96	0.43	6.6	6.6	8.6	8.2	0.739	0.97	1.23
Buoy B	0.93	0.95	1.51	1.62	0.823	1.01	0.36	6.6	6.4	8.5	8.2	0.640	0.95	1.44
Buoy C	0.81	0.77	1.34	1.33	0.850	0.94	0.28	6.6	6.3	8.4	7.9	0.541	0.93	1.47
Buoy D	0.60	0.70	1.04	1.09	0.814	1.04	0.24	4.7	4.7	6.1	5.9	0.530	0.97	1.09
Hamada	0.37	0.38	0.63	0.61	0.858	0.94	0.12	3.8	3.8	4.7	4.5	0.514	0.97	0.73
MT St.	0.29	0.29	0.47	0.54	0.879	1.03	0.10	3.4	3.6	3.9	4.0	0.007	1.03	0.60
Isewan Pt.	0.32	0.27	0.49	0.46	0.802	0.84	0.12	3.7	3.4	4.7	3.8	-0.006	0.88	0.98
Sea-berth	0.23	0.25	0.40	0.43	0.782	0.97	0.11							
Yokkaichi	0.22	0.19	0.35	0.35	0.844	0.87	0.09	3.2	3.1	4.2	4.4	0.582	0.96	0.90
Jyounan	0.21	0.19	0.34	0.35	0.772	0.88	0.10	3.4	3.5	4.2	3.8	-0.067	0.99	0.89

表-4 月別波候統計量の誤差指標(全観測地点)

location		Buoy A	Buoy B	Buoy C	Buoy D	Hama- da	MT St.	Isewan Pt.	Sea- berth	Yokka- ichi	Jyou- nan
period (YY.MM)		96.03	95.01	99.09	97.01	96.01	00.07	02.04	95.01	95.01	00.01
		03.12	99.08	02.10	00.09	03.12	03.12	03.12	03.12	96.12	03.12
r		0.775	0.837	0.850	0.715	0.839	0.848	0.861	0.928	0.758	0.826
H_{sm}	ρ_H	0.848	0.876	0.937	0.725	0.793	0.910	0.524	0.365	0.979	0.909
	a_{0H}	0.99	1.03	0.96	1.14	1.01	1.01	0.83	1.06	0.87	0.88
H_{s3}	ρ_H	0.855	0.893	0.937	0.800	0.869	0.939	0.461	0.361	0.975	0.911
	a_{0H}	1.00	1.07	0.99	1.05	0.96	1.12	0.92	1.06	0.99	1.02
H_{s10}	ρ_H	0.868	0.854	0.924	0.804	0.908	0.927	0.492	0.531	0.966	0.883
	a_{0H}	1.01	1.07	0.98	0.98	0.90	1.09	0.88	0.96	1.00	0.99
T_{sm}	ρ_T	0.896	0.834	0.813	0.732	0.770				0.915	
	a_{0T}	0.99	0.94	0.96	0.99	1.00				0.98	
T_{s3}	ρ_T	0.886	0.861	0.625	0.603	0.761				0.879	
	a_{0T}	0.95	0.96	0.93	0.96	0.97				1.00	
T_{s10}	ρ_T	0.856	0.829	0.521	0.526	0.548				0.743	
	a_{0T}	0.94	0.98	0.93	0.96	0.93				1.02	

南では、周期観測資料にスパイク状ノイズが多く含まれることから、推算資料と観測資料の相関は非常に低い。

比較期間の長さを順次短くして推算資料と観測資料の対応をより詳しくみるために、図-7は四日市における累月平均の波高・周期および高波出現率 p_H の月変化を、図-8は城南における月別の各種平均波高の相関図を例示する。四日市では両資料に基づく各累月平均値の対応は良好である。城南の月別値については、低波高部で推算波高が観測波高より低い値をとるが、全体として両者はかなりよく符合する。

表-4は月別波高・周期統計量に対する誤差指標(相関係数 ρ_H 、 ρ_T と原点を通る勾配値 a_{0H} 、 a_{0T})の一覧を示す。ただし、周期観測資料においてスパイク状ノイズが目立つMT局、伊勢湾地点、城南および周期観測資料が得られていないシーパースについては周期の欄を空欄としている。相関係数は波高についておおむね0.8より大きく、周期について T_{s10} を除き0.6を越え、勾配値は波高・周期のいずれについても1前後の値をとるケースが多いことから、推算資料と観測資料はよく符合する。ただし、伊勢湾地点やシーパースでは波高の各種月平均値の変動範囲が狭いので、相関係数の値は相対的に小さくなるけれども、勾配値 a_0 は1前後の値をとり、平均的に推算結果と観測結果は符合すると言える。したがって、月単位の各種平均値でみても、推算資料と観測資料の対応は波高と周期それぞれについてかなり良好であることが示唆される。

5. 結 語

本研究の成果はつぎのようにまとめられる。

①伊勢湾では、沿岸部のみならず海上部の広い範囲に分布する多数地点で約10年間の風観測資料が取得されているので、これらを用いて海上風分布を高い精度で推定することが可能である。

②伊勢湾では、平均風速は湾奥から湾外に向けて夏季に約40%、それ以外の季節で2倍程度に増大する。卓越風向は夏季にSE、それ以外の季節でNWであり、年間を通じて伊勢湾の湾軸がほぼ風の通り道になっている。

③本システムによる外洋ブイA地点の波浪資料は、空間解像度0.5°のECMWF-WAM資料より高い精度をもち、高波高部や周期についてその傾向が明瞭である。

④本システムは、伊勢湾外から湾奥の地点における数年間以上の波浪の特性をかなり精度よく再現する。

最後に、膨大な風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

- 大澤輝夫・小林智尚・安田孝志 (2004): 伊勢湾における海況特性を考慮した洋上風発電ポテンシャルの検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1266-1270.
- 塩野清治・弘原海 清・升本眞二 (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.
- 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.
- 山口正隆・渡辺 健・畑田佳男 (1981): 大阪湾における海上風の平面分布特性について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 168-172.
- 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, No.381/II-7, pp. 151-160.