

相模湾周辺海域における波高の年別変動と長期変動の考察

山口正隆¹・大福 学²・畑田佳男³・野中浩一⁴

相模湾周辺海域沿岸における最長25年間の波浪観測資料と46年間の波浪推算資料を解析することによって、冬季と夏季における波高・周期の年別変動と長期変動の特性を検討した。主要な結果はつぎのようである。1) 冬季の波高における有意な増加傾向は1986年から1987年を境とする波高ジャンプに依存する。冬季の周期や夏季の波高・周期における傾向変動は見出されない。2) 強いエルニーニョ年で波高や周期の時系列がピーク値をとる傾向は夏季で明確に現れる。冬季にはある程度認められるにすぎない。3) 長期波浪推算が夏季における波高・周期の年変化を再現するけれども、波高ジャンプを伴う冬季の年変化については符合する結果を与えない。

1. 緒 言

近年、地球環境の変化を表す指標の1つとして、波高の年別変動や長期変動が世界規模で注目されている。わが国沿岸の波浪についても、いくつかの研究が報告されているが、波高の傾向変動に関してこれらの結果は必ずしも相互に整合しない。

そこで本研究では、長期の観測資料が複数地点で取得されている相模湾周辺海域に着目して、季節別波高・周期の年別変動や傾向変動の特性を観測資料と推算資料の解析結果に基づいて考察する。

2. 波浪資料と解析方法

(1) 観測資料

本研究で使用する観測資料は、1979～2003年の間に平塚（1979～2003年、水深20m）、石廊崎（1979～2003年、水深51m）、波浮（1979～2003年、水深48m）、下田（1988～2003年、水深50m）、浜金谷（1979～1990年、水深22m）、第二海堡（1991～2003年、水深29m）において、1～3時間間隔で得られた波浪資料（有義波高 H_s 、有義波周期 T_s ）である。解析は資料期間が長い平塚、石廊崎、波浮における資料を主資料とし、資料期間が短い下田、浜金谷、第二海堡における資料を副資料として進める。また、平塚（1981～2003年）、石廊崎灯台（1979～2003年）、伊豆大島灯台（1979～2003年）における1時間間隔の風観測資料（10分間平均風速 U_s 、平均風向 θ_w ）も使用する。図-1は各地点の位置を示す。

主な解析対象は、季節別毎年測得率が75%以上の波高・周期資料より得た季節別の毎年上位1/3資料の平均

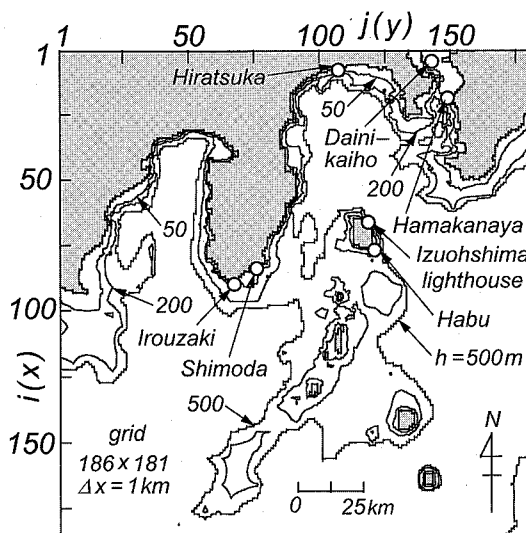


図-1 観測地点の位置および小領域水深格子網

値（1/3（最大）平均（有義）波高 H_{s3} 、1/3（最大）平均（有義波）周期 T_{s3} ）であり、高波高部・長周期部に注目する。波高と周期の累年1/3平均値は相模湾湾口部の石廊崎で2m、8.5s、波浮で2.2m、9s、相模湾湾奥部の平塚で1m、8.4sをとるほか、石廊崎に隣接するが、周辺地形の遮蔽効果を受ける下田で1.4m、9s、東京湾口の浜金谷で1m、6.5s、湾内の第2海堡で0.5m、4sであり、それぞれの湾内で波浪の規模が小さい。

(2) 推算資料

波浪推算の入力条件として、時間間隔6時間、空間解像度約1.9°のNCEP/NCAR表面風再解析資料を北西太平洋領域に設けた格子間隔80kmの格子網上に2次元4点補間することにより作成した風資料を1時間ごとに線形補間したのち、1時間間隔の台風モデル風を組み込んだ10m高度風資料（NCEP風資料）を用いる。期間は1958～2003年の46年とする。

波浪推算は、格子間隔5kmの北西太平洋領域に格子間隔1kmの波浪推算地点周辺小領域（図-1）を組み込

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 正会員 博(工) 愛媛大学大学院理工学研究科講師
4 正会員 博(工) 愛媛大学契約職員

んだ2段階高地形解像度格子網で、1点浅海モデル（山口ら, 1987）により時間間隔を1時間として地点別に実施する。波浪推算の対象地点は平塚、石廊崎、波浮の3地点である。各成分波の波向線上波計算点における海上風は、80 km 格子網上のNCEP 風速成分資料を2次元4点補間することにより求める。

3. 冬季波浪の変動特性

(1) 観測資料に基づく解析

図-2はそれぞれの冬季累年1/3平均値で無次元化した冬季毎年1/3平均波高 $\bar{H}_{s3}$ と1/3平均周期 $\bar{T}_{s3}$ および測得率 r の経年変動を6地点で示す。測得率は、75%以下の年が多少目立つ波浮を除き、全体として非常に大きい。 $\bar{H}_{s3}$ や $\bar{T}_{s3}$ は、平塚を除く地点でいずれも平均値のまわりにはば変動する。平塚における $\bar{H}_{s3}$ は、全体として増加傾向、あるいは1986年までの前半期間と1987年以降の後半期間でその平均値まわりの大きな変動をもち、1986年から1987年を境とする不連続的な増加を与える。この傾向は平塚の場合ほどでないにしても、石廊崎と波浮において多少認められる。一方、 $\bar{T}_{s3}$ はいずれの地点でもほとんど不連続的な変化を伴わない。

平塚、石廊崎、波浮における両期間の $\bar{H}_{s3}$ の平均値の差、すなわち「波高ジャンプ」の量は、それぞれの期間

の季節別平均値に対して17.6%, 7.9%, 6.8%であり、平塚におけるジャンプ量が他の2地点の2倍以上とかなり大きい。各地点の波高ジャンプ量は有意水準5%の片側 t 検定やMann-Whitney検定（除ら, 2002）で統計的に有意と判断される。統計的判定に使用される t_0 値（ t 分布, t 検定）や z_0 値（正規分布, Mann-Whitney検定）は上述のジャンプ量を反映して、石廊崎や波浮に比べて平塚で約1大きいことから、平塚では「波高ジャンプ」の程度が著しい。一方、 $\bar{T}_{s3}$ の期間別平均値の差に対する統計的有意性は3地点とも検出されない。

ついで、 $\bar{H}_{s3}$ 時系列と $\bar{T}_{s3}$ 時系列の類似性は波浮および下田である程度みられ、相関係数はそれぞれ0.50と0.49である。しかし、平塚を含む他の地点では、類似性はあまり見出されない。このほか、Sasakiら（2005）によって議論されたエルニーニョ年と平均波高や平均周期との関係は、大規模なエルニーニョが生じた1982～1983年の冬季および1997～1998年の冬季においても各地点に共通して際立った特徴が見出されないことから、明確でない。また平塚、石廊崎、波浮における $\bar{H}_{s3}$ および $\bar{T}_{s3}$ それぞれの地点間相関を全期間、前半期間、後半期間でみると、前半期間の平塚－石廊崎間、平塚－波浮間で相関係数の絶対値が約0.25と弱い。他のケースでは相関係数がおおよそ0.5より大きく、ある程度の相関が得られるが、必ずしも強くない。

図-3は平塚における無次元1/3平均波高 $\bar{H}_{s3}$ と無次元1/3平均風速 $\bar{U}_{s3}$ の時系列を示す。 $\bar{U}_{s3}$ は平塚における波浪の発達に寄与する風向W-S-Eの半平面に風速資料を限定して算出している。両者は相関係数0.66をとり、ある程度類似する。一方、石廊崎および波浮では両者の相関は実質的には存在しない。すなわち、平塚における冬季波浪は相模湾内の局所風で発達する風波と関係する可能性が高いのに対して、石廊崎や波浮における冬季波浪は外洋近海で発達する風波の影響を強く受けると推測される。こうした点を考慮すると、3地点における1987年以降の $\bar{H}_{s3}$ の不連続的な増加の原因として、前半期間から後半期間にかけての南寄りの局所風の変化が示唆される。

表-1は平塚、石廊崎、波浮の冬季年別 H_{s3} 資料と T_{s3} 資料に対する累年平均値およびこれらの無次元年別資料

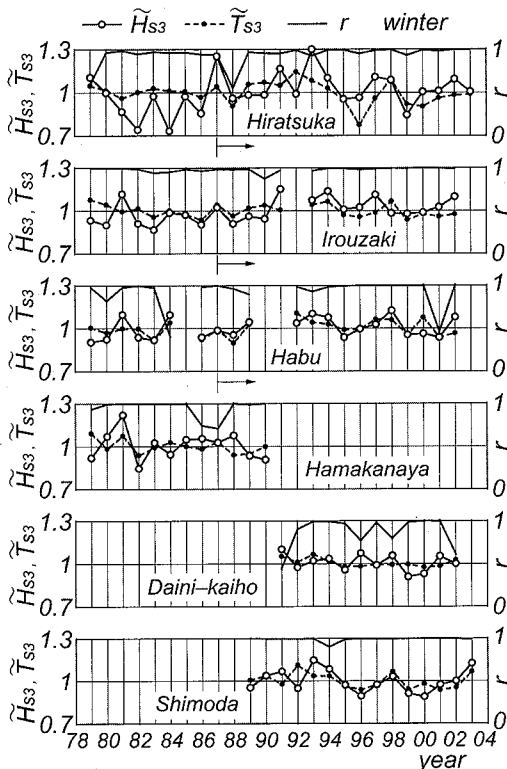


図-2 冬季波浪の年時系列

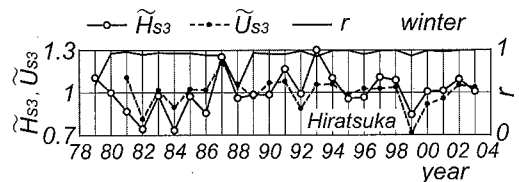


図-3 冬季の波浪および風速の年時系列

に対する勾配値 a %/year, 片側 t 検定に基づいて作成した傾向変動指標 L (有意水準 5% で増加・減少傾向 $L = \pm 1$, それ以外 $L = 0$), 資料数 $n > 20$ の欠落を伴わない資料を対象とした鈴木 (1975) のトレンド示数 I_t ($|I_t| > 1.65$ の場合, 有意水準 5% で増加・減衰傾向) を期間別に示す. 1986 年から 1987 年を境とする「波高ジャンプ」についてはすでに上で述べた.

表-1 冬季波浪資料に対する傾向変動の解析結果

loc.	data	H_{s3}			T_{s3}		
		'79-'86	'87-'03	'79-'03	'79-'86	'87-'03	'79-'03
Hiratsuka	m	0.83	0.99	0.94	7.6	7.6	7.6
	a	-0.82	-0.84	0.65	-0.14	-0.89	-0.28
	L	0	0	0	0	-1	0
	I_t	-1.05	-0.54	1.72	-0.45	-1.53	-0.71
Irouzaki	m	2.12	2.30	2.24	7.5	7.5	7.5
	a	-0.34	0.33	0.52	-1.64	-0.36	-0.16
	L	0	0	1	-1	0	0
	I_t	-0.25	0.74	2.30	-2.47	-1.24	-1.19
Habu	m	2.15	2.30	2.26	8.3	8.7	8.5
	a	-0.11	0.18	0.42	-1.24	0.19	0.27
	L	0	0	1	-1	0	0
	I_t	0.94	0.37	2.20	-1.69	0.37	1.01

m (mean): H_{s3} m, T_{s3} s, a : %/year

傾向変動を 1979~2003 年の全期間でみると, $\tilde{H}_{s3}$ はいずれの地点でも正の勾配値 a (増加傾向) をもち, 太字で表した L および I_t の値が示すように, 石廊崎と波浮における増加傾向は有意水準 5% で統計的に有意である. $\tilde{H}_{s3}$ の年別変動が大きいため傾向変動指標 L では統計的有意性が認められない平塚においても, 勾配値 a とその変動幅は 0.65 ± 0.69 %をとるから, 有意水準値を少し大きくすれば, 統計的有意性が認められる. また $\tilde{T}_{s3}$ について, 傾向変動はいずれの地点でも検出されない.

ついで期間別でみると, 勾配値は前半期間において 3 地点で負の値をとり, とくに平塚で -0.82 %/year と絶対値が圧倒的に大きい. 後半期間では石廊崎と波浮で正の値をとるのに対して, 平塚では前半期間と同様, 大きい負の値を示す. この結果, 石廊崎や波浮では全期間についての勾配値の絶対値が前半・後半期間より大きくなり, 平塚では小さくなる. このため, 期間別にはいずれの地点でも統計的に有意な傾向変動が見出されないとしても, 対象期間全体では石廊崎と波浮で統計的に有意な増加傾向が検出され, 平塚で検出されないことになる. $\tilde{T}_{s3}$ については平塚で後半期間に, 石廊崎と波浮で前半期間に統計的に有意な減少傾向が見出される.

(2) 推算資料

図-4 は平塚と石廊崎における $\tilde{H}_{s3}$ および $\tilde{T}_{s3}$ の年時系列に対する推算結果と観測結果の比較を示す. 波浪推算資料は各地点における $\tilde{H}_{s3}$ と $\tilde{T}_{s3}$ の年別変動について,

とくに $\tilde{T}_{s3}$ に関して観測資料とよく符合するが, 平塚では前半期間の波高値に対して適正に対応しない. つまり, 観測資料にみられる 1986 年と 1987 年を境とする $\tilde{H}_{s3}$ のジャンプは, 入力条件とした NCEP 風資料の地形解像度が低いことから, ほとんど再現されない. したがって, 傾向変動の判別結果も $\tilde{H}_{s3}$ に関しては観測資料の場合と異なる. 一方, $\tilde{T}_{s3}$ について判別結果は一致する.

図-5 は 1958~2003 年の推算資料から求めた $\tilde{H}_{s3}$ と $\tilde{T}_{s3}$ の経年変動を平塚について例示する. $\tilde{H}_{s3}$ 時系列が 1998 年と 1993 年のピーク値に加えて 1972 年, 1973 年に最大のピーク値をとる点を除いて, $\tilde{H}_{s3}$ と $\tilde{T}_{s3}$ 資料はそれぞれ平均値のまわりを変動しており, 一方向的な増加・減少傾向を与えない. 要するに, 資料期間を 46 年間としても, 各地点における $\tilde{H}_{s3}$ 資料および $\tilde{T}_{s3}$ 資料には統計的に有意な傾向変動は検出されない.

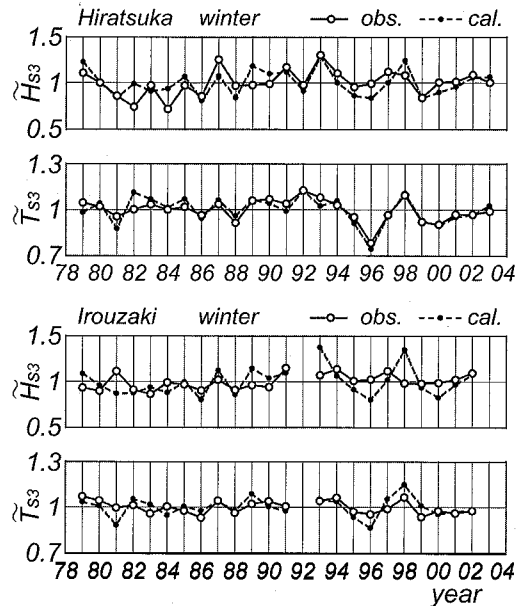


図-4 冬季波浪の年時系列の比較

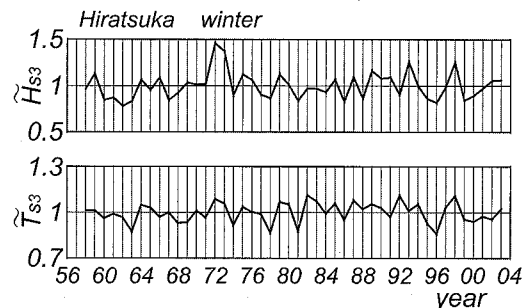


図-5 冬季推算波浪の年時系列

4. 夏季波浪の変動特性

(1) 観測資料に基づく解析

図-6は6地点における $\tilde{H}_{s3}$ と $\tilde{T}_{s3}$ および測得率の経年変動を示す。冬季と同様に、測得率が75%以下の年は波浮で相対的に多く他の地点で少ないが、平塚では1982年以前で測得率が低くなっている。夏季における波浪の規模は台風の来襲の多寡に依存するので、 $\tilde{H}_{s3}$ や $\tilde{T}_{s3}$ の年ごとの変動が大きい。すなわち、20世紀最大のエルニーニョが発生した1997年や、これに次ぐ規模の1982・1983年とごく最近のエルニーニョ年とされる2002年に、ほぼいずれの地点でも大きなピーク値をとるが、その他の年でもピーク値を与えることから、両者の関係は必ずしも一貫しない。しかし、強いエルニーニョ年には、台風に関して勢力の強化、北東進傾向の増進および南方海域における滞在時間の拡大などの特徴が現れる傾向にあることから、これが相模湾の波浪に影響している可能性は排除できない。

また、夏季の $\tilde{H}_{s3}$ の年時系列には1986年から1987年を境とするジャンプはみられないし、統計的に有意な $\tilde{H}_{s3}$ や $\tilde{T}_{s3}$ の一方的増加・減少の傾向も観察されない。前者は $\tilde{H}_{s3}$ や $\tilde{T}_{s3}$ についての前半期・後半期の平均値の

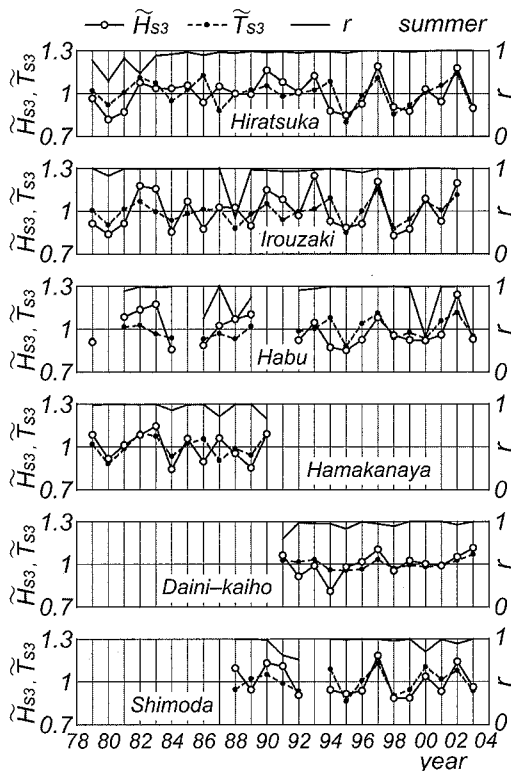


図-6 夏季波浪の年時系列

差に対する t 検定やMann-Whitney検定、後者は $\tilde{H}_{s3}$ や $\tilde{T}_{s3}$ の時系列勾配値に対する t 検定やトレンド示数によって確認される。全期間の $\tilde{H}_{s3}$ と $\tilde{T}_{s3}$ の相関を地点別にみると、相関係数は平塚で0.49、石廊崎で0.54、波浮で0.51、他の3地点でもほぼ0.65であるから、両者の間に弱いながら、ある程度有意な相関が存在する。

表-2は $\tilde{H}_{s3}$ および $\tilde{T}_{s3}$ についての地点間相関係数の期間別一覧を示す。平塚、石廊崎、波浮の間では、波高・周期のいずれについても強い相関が全期間および後半期間でみられる。とくに、周期に関して相関係数は全期間で0.80~0.86、後半期間で0.86~0.96とかなり大きい。夏季には外洋から伝播する波浪が卓越することから、波高や周期に関する地点間の相関が強く、とりわけ周期についてその傾向が顕著である。同様の強い地点間相関は下田、浜金谷についてもみられる。このことは相模湾口の石廊崎、波浮および下田のみならず、相模湾奥の平塚や東京湾湾口の浜金谷においても外洋から伝播する波浪の影響が著しいことを示唆する。

表-2 夏季における波高・周期の地点間相関係数

period	location	ρ ($\tilde{H}_{s3}$)	ρ ($\tilde{T}_{s3}$)
'79-'03	Hiratsuka-Irouzaki	0.85	0.80
	Hiratsuka-Habu	0.63	0.81
	Irouzaki-Habu	0.72	0.86
'79-'86	Hiratsuka-Irouzaki	0.53	0.69
	Hiratsuka-Habu	-0.17	0.20
	Irouzaki-Habu	0.84	0.73
'87-'03	Hiratsuka-Irouzaki	0.92	0.86
	Hiratsuka-Habu	0.84	0.96
	Irouzaki-Habu	0.67	0.92

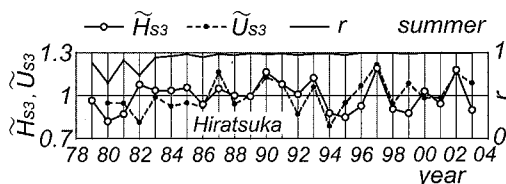


図-7 夏季の波浪および風速の年時系列

図-7は平塚における夏季の $\tilde{H}_{s3}$ と $\tilde{T}_{s3}$ の年時系列を示す。両資料間の相関係数は全期間の場合0.59であるから、ある程度の統計的有意性が認められるが、両者の時系列の対応からも推測されるように、相関は後半期間で強く、前半期間で相対的に弱い。いずれにしろ、両者の相関は冬季ほどでない。この傾向は石廊崎および波浮においても灯台風速資料との間に現れている。

(2) 推算資料

図-8は推算資料と観測資料に基づく $\tilde{H}_{s3}$ および $\tilde{T}_{s3}$ の経年変動を平塚と石廊崎について示す。推算波高はエ

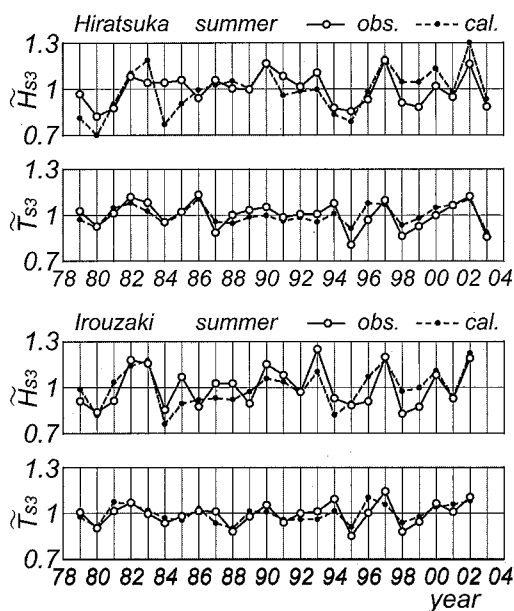


図-8 夏季波浪の年時系列の比較

ルニーニョ年にあたる1997年, 1982・1983年, 2002年のピーク値出現に関して各地点とも観測波高とはほぼ符合し, 年別変動パターンも観測波高のものと類似する。推算周期は観測周期との一層よい対応を与える。したがって, 夏季の推算資料には統計的に有意な波高・周期の傾向変動が検出されないという結果は観測資料の場合と一致する。なお, $\tilde{H}_{s3}$ や $\tilde{T}_{s3}$ の年変動幅が最近において増大する傾向がとくに $\tilde{T}_{s3}$ にみられるようである。

図-9は46年間(1958~2003年)の $\tilde{H}_{s3}$ と $\tilde{T}_{s3}$ の経年変動を平塚における推算資料に基づいて示す。ピーク値は1972年, 1982~1983年, 1997年, 2002年のエルニ

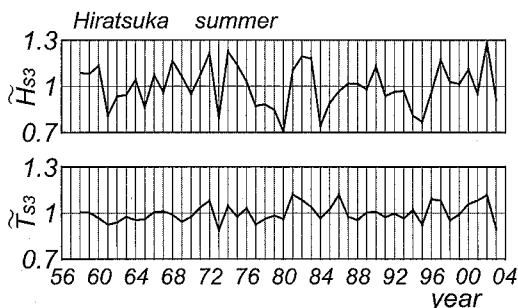


図-9 夏季推算波浪の年時系列

ーニョ年に加えてエルニーニョ年とされない1960年, 1968年, 1974年に出現している。逆に, 負のピーク値は1980年, 1984年, 1995年のほか, 1973年, 1961年に現れているが, このうち1973年のみがラニーニャ年に相当する。また, 波高の一方向的増加・減少傾向はほぼ存在しない。しかし, $\tilde{T}_{s3}$ は勾配値 $a=0.11\%/year$, 傾向変動指標 $L=1$, トレンド示数 $I_t=1.60$ をとり, 弱い増加傾向が検出される。一方, 石廊崎や波浮では同じ46年間において統計的に有意な波高・周期の傾向変動は認められない。

5. 結 語

本研究で得られた知見の概要はつぎのようである。

- ①冬季に相模湾湾奥部の平塚で見出される $\tilde{H}_{s3}$ の増加傾向は, 1986年から1987年を境とする不連続な波高の増加による。同じ傾向が湾口部の石廊崎や波浮でも認められるが, その増加率は平塚と比べて1/2以下と小さい。こうした波高の不連続的な増加は冬季における南寄りの局所風系の変化に起因すると推測される。
- ②夏季における $\tilde{H}_{s3}$ および $\tilde{T}_{s3}$ の傾向変動はどの地点でも認められない。
- ③エルニーニョ年で $\tilde{H}_{s3}$ および $\tilde{T}_{s3}$ がピーク値をとる傾向は夏季で強く, 冬季でもある程度認められるが, ピークは必ずしもエルニーニョ年に生じると言えない。
- ④長期波浪推算はピーク年の出現を含めて $\tilde{H}_{s3}$ および $\tilde{T}_{s3}$ の年別変化を夏季で再現するけれども, 冬季の挙動に関してはとくに平塚で符合する結果を与えない。

最後に, 平塚における風・波浪観測資料を提供戴いた独立行政法人防災科学技術研究所岩崎伸一氏に謝意を表するとともに, NOWPHASによる波浪観測資料を利用したことを付記する。

参 考 文 献

- 除 宗学・竹内邦良・石平 博(2002): 日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプ及びトレンドに関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp. 121-126.
- 鈴木栄一(1975): 気象統計学(第5版), 地人書館, 314p.
- 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.
- Sasaki, W., S. I. Iwasaki, T. Matsuura, S. Iizuka and I. Watabe (2005): Change in wave climate off Hiratsuka, Japan, as affected by storm activity over the western North Pacific, Jour. Geophys. Res., Vol.110, C09008, doi: 10.1029/2004 JC002730.