

# 観測資料に基づくわが国沿岸の波候の経年変動と傾向変動の解析

## Analyses of Year-to-Year Variation and Trend for Wave Climatic Parameters along the Coasts of Japan Using Long-Term Measurement Data

山口正隆<sup>1</sup>・大福 学<sup>2</sup>・畑田佳男<sup>3</sup>・野中浩一<sup>4</sup>・江本邦夫<sup>5</sup>

Masataka YAMAGUCHI, Manabu OHFUKU, Yoshio HATADA  
Hirokazu NONAKA and Kunio EMOTO

Wave measurement data acquired over more than two decades along the coasts of Japan and the Pacific coast of USA are analyzed from three points of view (1) year-to-year variation, (2) jumps and (3) trends for wintertime- and summertime-mean values of significant wave height and period. Main findings are as follows: (1) the winter of 1998, containing the severest El-Niño period, gives the highest mean wave height along the western Pacific coast of Japan and the Pacific coast of USA. (2) a seesaw-like variation with a two-year period of season-separated mean wave heights along the Pacific coast of Japan may be observed and (3) one jump and an increasing trend in summer-time mean wave period data may be observed along the coasts of Japan.

### 1. 緒 言

近年における地球環境の変化の影響が波浪の気候学的特性を表す波候にも現われていると考えられる。波候の変化は海岸の有り様を大きく変える可能性をもつことから、その究明は重要な研究課題であり、観測資料に基づく波候変化の研究がわが国沿岸やアメリカ西岸を対象として種々（たとえば、Allan ら、2002）行われている。これらの研究の中でエルニーニョ年と冬季・夏季の波高平均値との関連や高波出現率の経年変動および年別・季節別の波高平均値の傾向変動が議論されているが、波候の変動特性についての包括的な検討事例はあまりない。

ここでは、わが国沿岸 31 地点における波高・周期の長期観測資料を、年別冬季・夏季平均値の①年別変動、②不連続的变化（ジャンプ）、③傾向変動（一方向的増加・減少）、の 3 つの観点から解析し、アメリカ西岸沖合と沿岸の各 3 地点やハワイ沖合の 2 地点における同様の結果と併せて、波候の変動特性を広範に考察する。

### 2. 波浪観測資料とその解析法

#### (1) 波浪観測資料

わが国沿岸の波浪観測資料は太平洋岸 16 地点、日本海沿岸 12 地点、東シナ海沿岸 3 地点の計 31 地点におけるもので、期間は 2003 年までの 21 ~ 29 年となってい

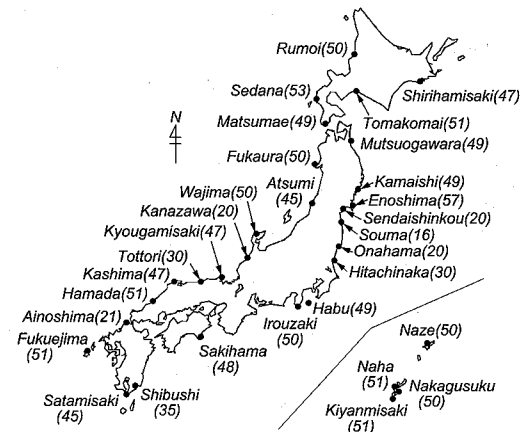


図-1 わが国沿岸における波高計の位置と水深

る。時間間隔は 2 時間（NOWPHAS 資料）あるいは 3 時間（気象庁沿岸波浪観測資料）である。図-1 は観測地点の位置と水深（m）を示す。このほか、アメリカ西岸沖合 3 地点と沿岸 3 地点およびハワイ沖合 2 地点における 2005 年までの最長 26 年間のブイによる 1 時間ごとの観測資料も使用する。図-2 はアメリカ西岸およびハワイ沖におけるブイの位置（番号、名称）と水深（m）を示す。

表-1 は代表地点における冬季・夏季・累年の（有義）波高  $H_s$  の平均値の一覧である。波高平均値はわが国太平洋岸では季節による波高差をあまりもたず、日本海沿岸に比べて冬季に小さく夏季に大きい。アメリカ側での波高は夏季より冬季に大きく、日本海沿岸の波高に近い季節特性を示唆するけれども、気象擾乱の特性が異なるなどの理由から、日本沿岸よりかなり大きい。

1 正会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科教授  
2 愛媛大学工学部技術専門職員  
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) 愛媛大学工学部契約職員  
5 広成建設株式会社

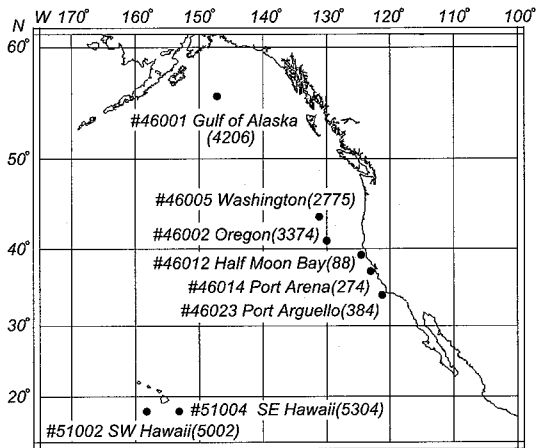


図-2 アメリカ西岸・ハワイ沖合におけるブイの位置と水深

表-1 代表地点における季節別波高平均値

| 地点    | 冬    | 夏    | 年    |
|-------|------|------|------|
| むつ小川原 | 0.98 | 1.12 | 1.09 |
| 石廊崎   | 1.43 | 1.11 | 1.23 |
| 喜屋武岬  | 0.95 | 1.23 | 1.09 |
| 輪島    | 2.01 | 0.58 | 1.19 |
| 浜田    | 1.79 | 0.63 | 1.12 |
| 名瀬    | 1.59 | 0.80 | 1.17 |
| 46002 | 3.67 | 1.78 | 2.68 |
| 46012 | 2.49 | 1.62 | 2.04 |
| 51002 | 2.77 | 2.16 | 2.42 |

単位: m

## (2) 解析方法

1～3時間間隔の有義波高  $H_s$  と有義波周期  $T_s$  あるいは平均周期(アメリカ側)の年ごとの冬季(12～2月)と夏季(6～8月)の平均値(毎年季節別波高・周期平均値)のうち、測得率75%以上のものを解析に有効な毎年季節別波候統計量資料とする。毎年季節別波候統計量はその累年平均値で割って無次元量(‘～’で標記)にする。

表-2は季節別波候統計量に対する地点間相関係数  $\rho(\bar{H}_s)$ ,  $\rho(\bar{T}_s)$  を代表地点について示す。近接する地点間の相関は波高に関して全体的に高い。そこで、資料の統計的変動を減少させるために、近隣2～4地点の毎年季節別波候平均値に関してその累年平均値を重みとする平均値として区域別無次元波候統計量を取り扱う。この結果、対象となる観測資料の期間が短くなる。

ジャンプの解析は毎年季節別または毎年波高・周期平均値資料から求めた前半・後半期間の平均値に対する  $t$  検定と前半・後半資料に対する Mann-Whitney の  $U$  検定(徐ら, 2002)による。有意水準5%の片側検定でジャンプ無しの場合、それぞれ  $J_i=0$ ,  $J_M=0$ , 正・負のジャンプ有りの場合  $J_i=\pm 1$ ,  $J_M=\pm 1$  で表す。期間の境界は1988年～1989年とする。

表-2 波高・周期資料に対する地点間相関係数

| 地点    | 地点    | $\rho(\bar{H}_s)$ |      | $\rho(\bar{T}_s)$ |        |
|-------|-------|-------------------|------|-------------------|--------|
|       |       | 冬                 | 夏    | 冬                 | 夏      |
| むつ    | 江ノ島   | 0.88              | 0.84 | 0.74              | 0.67   |
| 波浮    | 石廊崎   | 0.75              | 0.77 | 0.47              | 0.76   |
| 中城    | 喜屋武岬  | 0.85              | 0.86 | 0.43              | 0.79   |
| 輪島    | 金沢    | 0.91              | 0.91 | 0.83              | 0.85   |
| 名瀬    | 那覇    | 0.91              | 0.84 | 0.79              | 0.71   |
| 46002 | 46005 | 0.99              | 0.40 | 0.61*             | -0.13* |
| 46012 | 46023 | 0.84              | 0.25 | 0.85*             | 0.83*  |
| 51002 | 51004 | 0.79              | 0.83 | 0.70*             | 0.85*  |

\* 平均周期についての相関係数

傾向変動の解析は勾配値0に対する  $t$  検定とトレンド示数検定による。ここでは、有意水準5%の片側検定で勾配値0の仮説が成立する場合  $L=0$ , 正および負の有意な傾向変動がある場合それぞれ  $L=1$  および  $L=-1$  とする。トレンド示数  $I_t$  (鈴木, 1975) は有意水準5%の片側検定で  $|I_t| < 1.645$  の場合傾向変動なし、それ以外では符号に応じて正または負の傾向変動ありとする。

## 3. わが国太平洋岸とアメリカ西岸の波候の変動

### (1) 波候の年別変動

図-3はわが国太平洋岸16地点を2～4地点ごとに6沿岸区域に、アメリカ西岸6地点をアラスカ沖合(1地点)、西岸沖合(2地点)、西岸沿岸(3地点)の3区域、ハワイ沖合2地点をハワイ沖合(2地点)の1区域に分けて求めた冬季と夏季の無次元波高・周期平均値の年別変動図である。冬季において、波高は石廊崎または常陸那珂から北側の区域で1981年, 1984年, 1991年, 1997年, 2000年に、佐喜浜から西側の区域で1985年, 1990年, 1998年, 2001年にピークをとり、1991年と1990年の関係を除き、北側の区域より西側の区域でピーク年が1年遅れる。1997年春から1998年春(1998年冬)は20世紀最大のエルニーニョ期、1982年春から1983年夏(1983年冬)がこれに次ぐエルニーニョ期である。ピーク年がエルニーニョ年に相当する場合もあるが、エルニーニョ年でない年にもピークがみられることから、エルニーニョの発生とピークの発生は必ずしも符合しない。アメリカ西岸沖合と沿岸では1998年は第1位ピーク年、1983年は第2位ピーク年に相当するが、アラスカ沖合やハワイ沖合ではこの傾向はみられない。周期には日本側・アメリカ側のいずれでもピーク年は波高の場合ほど系統的に出現しない。

夏季において、波高は石廊崎または常陸那珂から北側の区域で1983年, 1988年, 1993年, 1998年, 2002年に、波浮から西側の区域で1982年, 1985年, 1990年, 1997年, 2002年にピークをとり、冬季と逆に、北側区域のピーク年が西側区域より1～2年遅れる傾向にある。

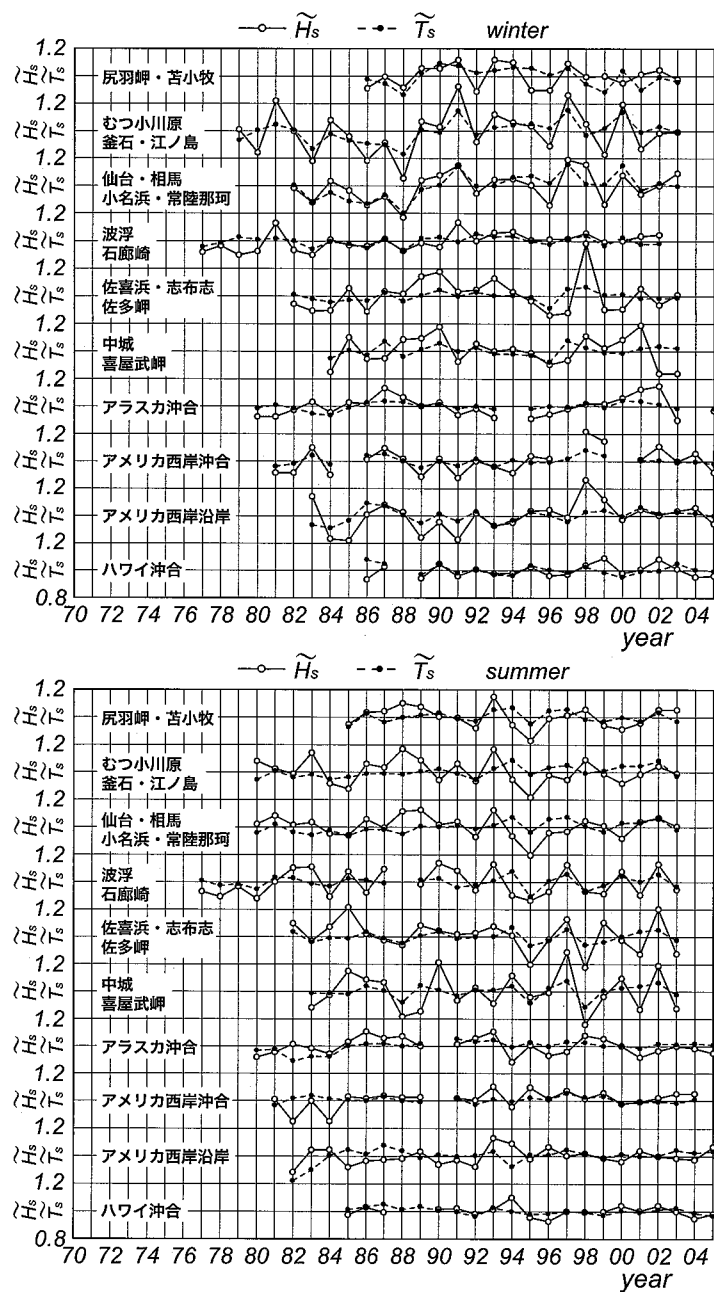


図-3 冬季および夏季における区域別波高・周期の平均値の年別変動

これは1997年と1998年において明瞭にみられる。また、1993年のピークは尻羽岬から佐多岬にかけての日本本土全体で現われているし、1997年と2002年（いずれもエルニーニョ年に相当する）のピークの突出度は波浮以西の区域で強い。アメリカ側では各区域に共通した明瞭なピーク年の出現はほとんどない。周期は日本側とアメリカ側の両区域で冬季と同様に波高の場合ほど特徴のある年別変動を示さない。

図-4は北側区域と西側区域でピーク年に1年のずれがみられる1997年と1998年における無次元波高平均値の区域別変化を示す。冬季においてピーク年(1997年)の波高が北側区域で大きい場合に西側区域で小さく、その翌年(1998年)に逆になるという、常陸那珂～波浮(関東沿岸北部)を中心とする一種のシーソー的変化の傾向が認められる。一方、夏季においてこの関係が逆転する。1983年と1984年では図-4の挙動と逆の傾向がみられる。

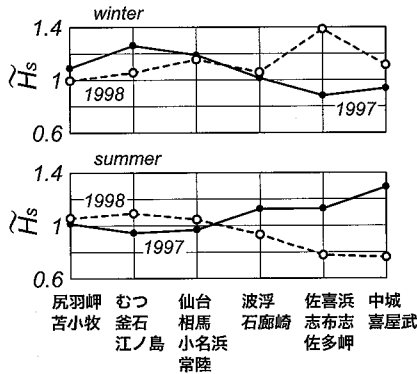


図-4 特定年の冬季と夏季の波高平均値の区域別変化

表-3 波高・周期資料に対するジャンプ検定の結果(1)

| 区 域  | 冬( $J_M$ )  |             | 夏( $J_M$ )  |             | 年( $J_M$ )  |             |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|      | $\bar{H}_s$ | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$ | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$ | $\bar{T}_s$ |
| 尻・苫  | 0           | 1           | 0           | 0           | 0           | 1           |
| む~江  | 1           | 1           | 0           | 1           | 1           | 1           |
| 仙~常  | 1           | 1           | 0           | 1           | 1           | 1           |
| 波・石  | 1           | 1           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| 佐~佐  | 0           | 1*          | 0           | 0           | 0           | 1           |
| 中・喜  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 1           |
| アラスカ | 0           | 0           | 0           | 1           | 0           | 0           |
| 西岸沖合 | 0           | 0           | 0*          | 0           | 0           | 0           |
| 西岸沿岸 | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| ハワイ沖 | 0           | 0           | 0           | -1          | 0           | 0           |

## (2) 波候のジャンプと傾向変動

冬季, 夏季, 通年の波高資料と周期資料をそれぞれ 1988 年以前と 1989 年以降に分けた場合のジャンプに対する  $t$  検定と Mann-Whitney 検定を行った結果の一覧が表-3 である。両検定の結果は\*印のケースを除いて符合するので, 後者を与える。冬季において, 波高資料はむつ小川原~江ノ島から波浮・石廊崎に至る 3 区域で, 周期資料は尻羽岬・苫小牧から佐喜浜~佐多岬の 5 区域(本土全域)で統計的に有意なジャンプの存在を示唆する。要するに, 冬季には東北沿岸を中心に広い範囲で 1988 年と 1989 年を境とする周期の系統的な不連続増加がみられ, 波高にもこの傾向が現われる。アメリカ西岸やハワイ沖合では, 波高・周期のいずれの資料にもジャンプは検出されない。

夏季において, 波高資料に対する検定はジャンプの存在を示唆しないが, 周期資料はむつ小川原~江ノ島と仙台南港~常陸那珂の 2 区域でジャンプの特徴を示す。アメリカ西岸では, アラスカ沖合やハワイ沖合でジャンプの存在が示唆される。年単位でみれば, 波高資料は東北沿岸で, 周期資料はほぼ全域で正のジャンプをもつ。

表-4 は冬季, 夏季, 通年における波高・周期の平均値資料についてトレンド示数  $I_t$  の 10 倍値の一覧を与える。この数値の絶対値が 16 以上の場合(太字)に有意

表-4 波高・周期資料の傾向変動の判別結果(1)

| 区 域  | 冬( $10 \times I_t$ ) |             | 夏( $10 \times I_t$ ) |             | 年( $10 \times I_t$ ) |             |
|------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
|      | $\bar{H}_s$          | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$          | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$          | $\bar{T}_s$ |
| 尻・苫  | 3                    | -9          | -6                   | 2           | -13                  | -10         |
| む~江  | 4                    | <b>19</b>   | -6                   | <b>32</b>   | 9                    | <b>29</b>   |
| 仙~常  | 15                   | <b>25</b>   | -6                   | <b>28</b>   | 15                   | <b>26</b>   |
| 波・石  | <b>31</b>            | 10          | 6                    | 3           | 8                    | -2          |
| 佐~佐  | 0                    | 8           | -11                  | 4           | -14                  | 9           |
| 中・喜  | -3                   | 10          | 0                    | 13          | -6                   | 13          |
| アラスカ | 6                    | 8           | -3                   | <b>20</b>   | 4                    | 15          |
| 西岸沖合 | 12                   | 4           | 15*                  | -7          | 14                   | 7           |
| 西岸沿岸 | 13                   | 15          | 13                   | <b>12*</b>  | 13                   | 11          |
| ハワイ沖 | 8                    | -6          | -2                   | <b>-21</b>  | 0                    | -1          |

な傾向変動の存在が示唆される。波高は冬季に波浮・石廊崎で有意な増加傾向を与える。アメリカ側では夏季の西岸沖合で波高のごく弱い増加傾向が  $L$  指標(\*印)により示唆されるが, テレンド示数では見出されない。周期は, むつ小川原~江ノ島と仙台南港~常陸那珂の 2 区域で冬季, 夏季, 通年において有意な増加傾向を与える。これは 1989 年を境とする周期資料のジャンプを反映する。アメリカ側では夏季にアラスカ沖合と西岸沿岸( $L$  指標のみ)で増加傾向が, ハワイ沖で減少傾向が検出される。

## 4. 日本海沿岸と東シナ海沿岸の波候の変動

## (1) 波候の年別変動

図-5 は日本海沿岸と東シナ海沿岸の 15 地点を波候の類似性を考慮して 2 地点ごとに 8 区域(温海は単独)に分けて求めた冬季と夏季の波高平均値の年別変動を示す。冬季において, 波高は日本海沿岸の輪島・金沢あるいは温海から東シナ海沿岸の那覇・名瀬に至る西側区域で 1984 年, 1991 年, 温海あるいは松前・深浦より北側の区域で 1988 年, 1994 年, 2001 年, 鹿島・浜田より北側の区域で 1996 年にピークを生じており, 1991 年におけるピークの突出度が高い。また, 太平洋岸にみられた, ピーク年が北側区域と西側区域で 1 年ずれるという傾向は現われない。

夏季において, 波高は輪島・金沢から西側の区域で 1983 年, 1991 年, 1998 年に, 温海より北側の区域で 1995 年, 1997 年に, 全区域で 2002 年に共通したピークをとり, 1983 年, 1991 年, 1998 年, 2002 年のピークの突出が比較的顕著である。また, 北側区域のピーク年(1997 年)が西側区域のピーク年(1998 年)より 1 年先行する傾向がみられるが, これは西側区域のピーク年(1997 年)が先行する夏季の太平洋岸の傾向と, 逆の関係にある。

## (2) 波候のジャンプと傾向変動

表-5 は冬季・夏季・通年の波高・周期の平均値資料に対するジャンプ検定結果の一覧を表す。冬季において, 波高資料は藍島・福江島の 1 区域で負のジャンプを, 周

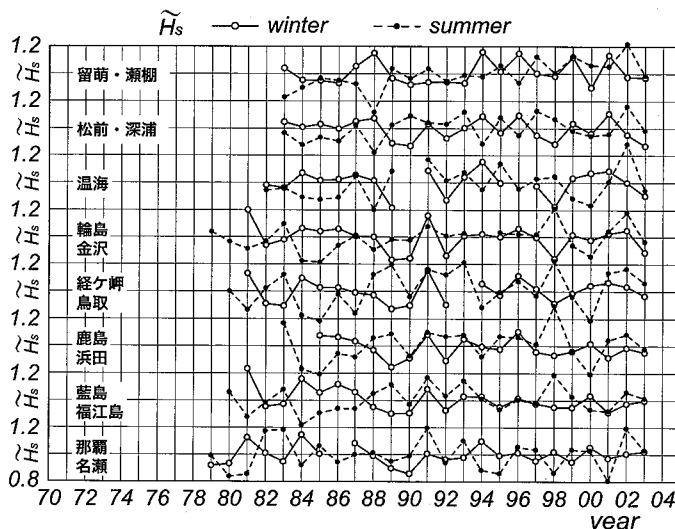


図-5 冬季および夏季における区域別波高平均値の年別変動

表-5 波高・周期資料に対するジャンプ検定の結果(2)

| 区 域 | 冬( $J_M$ )  |             | 夏( $J_M$ )  |             | 年( $J_M$ )  |             |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|     | $\bar{H}_s$ | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$ | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$ | $\bar{T}_s$ |
| 留・瀬 | 0           | 0           | 1           | 1           | 0           | 1           |
| 松・深 | 0           | 0           | 1           | 0*          | 0           | 1           |
| 温海  | 0           | 0           | 1           | 0           | 0           | 0           |
| 輪・金 | 0           | 0           | 1           | 1           | 0           | 1           |
| 経・島 | 0           | 0           | 1           | 0           | 0           | 0           |
| 鹿・浜 | 0           | 0           | 0           | 1           | 0           | 1           |
| 藍・福 | -1          | 1           | 0*          | 1           | 0           | 1           |
| 名・那 | 0           | 1           | 0           | 1           | 0           | 1           |

表-6 波高・周期資料の傾向変動の判別結果(2)

| 区 域 | 冬( $10 \times I_t$ ) |             | 夏( $10 \times I_t$ ) |             | 年( $10 \times I_t$ ) |             |
|-----|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
|     | $\bar{H}_s$          | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$          | $\bar{T}_s$ | $\bar{H}_s$          | $\bar{T}_s$ |
| 留・瀬 | 4                    | 13          | 34                   | 19          | 9                    | 12          |
| 松・深 | -8                   | 12          | 15                   | 5           | 2                    | 21          |
| 温海  | 1                    | 10          | 7                    | -27         | 15                   | -2          |
| 輪・金 | -7                   | 10          | 15                   | 27          | -6                   | 26          |
| 経・島 | 3                    | 2           | 13                   | 5           | 21                   | 10          |
| 鹿・浜 | -12                  | 5           | 5                    | 18          | -4                   | 23          |
| 藍・福 | -17                  | 24          | 7                    | 18          | -17                  | 28          |
| 名・那 | 4                    | 26          | 0                    | 18          | -8                   | 21          |

期資料は藍島・福江島、名瀬・那覇の2区域で正のジャンプをもつ。夏季において、波高資料は5区域で、周期資料は8区域中5～6区域で正のジャンプを示唆する。通年では波高資料には、いずれの区域でもジャンプは見られず、周期資料には6区域でジャンプが存在する。

表-6は傾向変動解析の結果を表す。波高について、冬季に藍島・福江島で有意な減少傾向、夏季に留萌・瀬棚で増加傾向、年単位では経ヶ岬・鳥取で増加傾向が検出される。周期について、冬季に藍島・福江島と名瀬・那覇の2区域で増加傾向、夏季に留萌・瀬棚、温海、輪島・金沢、鹿島・浜田、藍島・福江島、名瀬・那覇の6

区域で増加傾向、年単位でも8区域のうち5区域で増加傾向が検出される。

## 5. 結 語

以上の検討結果はつぎのように要約される。

- ①エルニーニョの最も強い時期にあたる1998年冬は、わが国太平洋岸の西側区域やアメリカ西岸で波高の第1位ピーク年になるが、北側区域では1997年にピークをとるなど、エルニーニョ年と波高のピーク年の対応は一貫しない。また、1997年と1998年など相隣る1年で関東沿岸北部を境として北側区域と西側区域における波高の大小関係にシーソー的な変化が生じる。
- ②太平洋岸の東北沿岸を中心に冬季の波高・周期は1988年と1989年を境としたジャンプを示すが、夏季にはその傾向は周期に限られる。日本海でも夏季を中心に波高・周期にジャンプが検出される。アメリカ西岸ではジャンプの傾向はあまりみられない。
- ③波高は全体として、冬季・夏季・年によらず、有意な傾向変動をあまり与えないが、周期について有意な傾向変動が太平洋岸の東北沿岸や日本海沿岸（冬季を除く）と東シナ海沿岸の多くの区域で検出される。

## 参 考 文 献

- 徐 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.
- Allan, J.C. and P.D. Komar (2002): Extreme storms on the Pacific Northwest coast during the 1997-98 El Niño and 1998-99 La Niña, Jour. Coastal Res., Vol. 18, pp. 175-193.