

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1241**      December 2011

全国港湾海洋波浪観測長期データに基づく日本沿岸の季節別  
波浪特性の経年変化

関    克己  
河合   弘泰  
佐藤    真  
川口   浩二

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 解析対象地点と波浪統計量の不確定性 .....	4
2.1 観測地点の変遷と本研究における解析対象地点 .....	4
2.2 波浪計の設置条件の変化 .....	7
2.3 データ処理方法の変化 .....	8
2.4 本研究における統計解析の基本方針 .....	10
3. 季節別平均値の経年変化傾向 .....	10
3.1 有義波高 .....	11
3.2 有義波周期 .....	11
3.3 静穏率 .....	11
3.4 波パワー .....	15
3.5 卓越波向 .....	15
4. 季節別最大値の経年変化傾向 .....	18
4.1 最大有義波 .....	18
4.2 最大最高波 .....	18
5. 平均有義波と気候変動指標の相関 .....	23
5.1 検討する気候変動指標と解析対象地点 .....	23
5.2 平均有義波高と気候変動指標の相関性 .....	23
5.3 平均有義波周期と気候変動指標の相関性 .....	24
6. まとめ .....	24
7. おわりに .....	25
謝辞 .....	25
参考文献 .....	25
付録 最高波高に対するデータ長の影響 .....	27

# Long-term Trend in Seasonal Wave Characteristics on Japanese Coast Based on NOWPHAS Data

**Katsumi SEKI\***

**Hiroyasu KAWAI\*\***

**Makoto SATOH\***

**Koji KAWAGUCHI\*\*\***

## Synopsis

The wave observation on the Japanese coast through the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS (NOWPHAS) has been conducted since 1970. The water depth and surrounding bathymetry of the observation site, equipment and data processing procedures changed at some locations during these four decades. This study, therefore, reviewed the change in the quality of the NOWPHAS data and then verified the long-term trend in the seasonal wave characteristics at 24 locations as well as the correlation between the wave characteristics and climatic indexes (SST, SO, AO, PDO and NPI) at 10 locations. The major conclusions are as follows:

1) The annual mean significant wave height increased at Ainoshima, Mutsuogawara, Hitachinaka and Nakagusukuwan and decreased at Habu. The seasonal mean significant wave heights increased at some locations.

2) The annual mean and the seasonal mean significant wave periods increased at many locations where extra-tropical cyclones are major inputs on waves rather than typhoons.

3) The mean wave energy flux increased at some locations mainly on the Sea of Japan and the Pacific Ocean coast of the southern region of Japan.

4) The annual-largest significant wave height increased at Sakata, Naze, Mutsuogawara and Hachinohe, the winter-largest significant wave height at some locations on the Sea of Japan coast, and the autumn-largest significant wave height at some locations on the Pacific coast of the Tohoku District. A significant trend is not significant in the largest significant wave periods.

5) The correlation of the mean significant wave height with the climatic indexes is low except SST.

**Key Words:** NOWPHAS, seasonal wave statistics, long-term trend, climatic index

---

\* Researcher, Marine Information Group, Marine Information Field  
\*\* Director, Marine Information Field  
\*\*\* Group Leader, Marine Information Group, Marine Information Field  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5048 Fax : +81-46-842-5246 e-mail:seki-k@pari.go.jp

# 全国港湾海洋波浪観測長期データに基づく日本沿岸の季節別 波浪特性の経年変化

関 克己\*・河合 弘泰\*\*・佐藤 真\*・川口 浩二\*\*\*

## 要 旨

1970年以來、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)により全国の沿岸で波浪観測が行われてきた。その40年間には、観測地点の水深やその周辺地形、観測機器、データ処理方法などに変化が生じた地点もある。そこで本研究では、NOWPHASのデータの質の長期的な変遷を再検討した。また、24地点における季節別の波浪特性の経年変化、10地点における波浪特性と気候指標（海水温：SST、南方振動指数：SO、北極振動指数：AO、太平洋十年規模振動指数：PDO、北太平洋指数：NPI）の相関性を検討した。得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 通年の平均有義波高は、藍島、むつ小川原、常陸那珂、中城湾において増加、波浮で減少の傾向を示している。季節別の平均有義波高でも増加傾向を示す地点がある。
- 2) 平均有義波周期は、台風より温帯低気圧の影響の大きな地方を中心とする多くの地点で、通年でも季節別でも増加傾向を示している。
- 3) 波パワーは、日本海側、太平洋側ともに南の地方を中心に、増加傾向を示す地点がある。
- 4) 通年の最大有義波高は酒田、名瀬、むつ小川原、八戸、冬季の最大有義波高は日本海沿岸、秋季の最大有義波高は東北地方の太平洋沿岸で、それぞれ増加傾向を示している。最大有義波周期の長期変動は顕著ではない。
- 5) 平均有義波と海水温の相関性に比べて、平均有義波と他の気候変動指標（SO、AO、PDO、NPI）の相関性は低い。

キーワード：全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS、季節別波浪統計、長期変動、気候指標

---

\* 海洋情報研究領域海象情報研究チーム研究官

\*\* 海洋情報研究領域長

\*\*\* 海洋情報研究領域海象情報研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5048 Fax：046-842-5246 e-mail:seki-k@pari.go.jp



## 1. はじめに

国土交通省（2000年12月以前は運輸省）港湾局と港湾空港技術研究所を含む関係機関は1970年以来、相互協力の下、全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours）を構築し、全国沿岸の波浪の観測・集中処理・解析を実施し、大量のデータを蓄積してきた。1970年に観測が開始されてから3、5、10、15、20、30年という節目の年にはその時の全観測地点で、各月や各年の平均や最大の有義波、主要な高波などを港湾技研資料（もしくは港湾空港技術研究所資料）として整理してきた（高橋ら、1975、1976、1981；菅原ら、1986；永井ら、1993；永井、2002）。これらの資料は毎年刊行する波浪観測年報とともに港湾計画や港湾構造物の設計波算定等に役立てられてきた。そして2009年末には観測開始から40年を迎えた。その間に観測地点およびその周辺の環境、観測機器の種類、データの処理や保存の方法、担当する技術者も変わってきており、近年と昔のデータを細かく比較するためには、過去のデータの質に関して精査・検討を行う必要がある。

IPCCの第三次報告書（2001）が将来の気温上昇や海面上昇量を発表し、2004年に気象庁の統計で史上最多となる10個の台風が上陸したことなどを切っ掛けとして、日本周辺の海象の長期変動に対する関心が高まってきた。将来の予測が難しいため、まずは過去のデータに遡り、波浪統計量に長期的な変動が存在するかどうかに関する研究が盛んに行われた。詳細は3章～5章で述べるが、例えば、清水ら（2006）、平石ら（2008）、間瀬ら（2009）はNOWPHASの観測データに基づく通年統計量の長期トレンドを解析し、近年になって高波の頻度が高まった地点があるなどの結果を得ている。しかしながら、微弱な気候変動のシグナルを捉えるためには、データの質の変化による統計量の変化を区別する必要がある。

そこで本研究では40年にわたって蓄積されてきたNOWPHASによる波浪観測データの質に関して再検討する。このような検討はデータの集中処理・解析を行っている当研究所ならではのものであり、今後も質の高い観測データを提供し続けるためにも必要な作業である。この再検討を終えた上で、日本沿岸の波浪特性の長期変動傾向を季節別に検討する。本論文では長期変動傾向の評価方法に直線回帰分析を用いる。季節・年平均の有義波の他、港湾活動に密着した指標として静穏率や波パワーについても検討する。さらに、代表的な気候変動指標を取り上げ、波浪統計量との相関解析を実施する。

## 2. 解析対象地点と波浪統計量の不確定性

### 2.1 観測地点の変遷と本研究における解析対象地点

全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）の波浪観測地点は2009年12月時点で72地点（GPS波浪計の11地点を含む）である（河合ら、2011）。表-2.1にGPS波浪計を除く61地点の観測開始時期を示し、図-2.1に観測地点数の推移を示す。これらの図表から分かるように、NOWPHASの開始当初の1970年に観測地点は留萌、酒田、金沢、苫小牧、潮岬の5地点であったが、1979年末には22地点、1989年末には32地点、1999年末には48地点と増えて来た。なお、これらの図表には既に観測を終了している地点を含んでいない。

表-2.1 観測開始時期

番号	地点名	波浪観測開始	番号	地点名	波浪観測開始
1	留萌	1970年01月	27	紋別(南)	2000年10月
2	石狩新港	2004年11月	28	釧路	2005年03月
3	瀬棚	1980年01月	29	十勝	1996年10月
4	青森	2006年03月	30	苫小牧	1970年01月
5	深浦	1979年12月	31	むつ小川原	1974年04月
6	秋田	1981年10月	32	八戸	1971年03月
7	酒田	1970年01月	33	久慈	1996年04月
8	新潟沖	1989年10月	34	宮古	2007年02月
9	直江津	1999年09月	35	釜石	1978年03月
10	富山	2002年09月	36	石巻	1995年03月
11	伏木富山	1999年09月	37	仙台新港	1979年01月
12	輪島	1979年01月	38	相馬	1982年08月
13	金沢	1970年01月	39	小名浜	1980年01月
14	福井	1980年09月	40	常陸那珂	1979年12月
15	敦賀	2005年03月	41	鹿島	1972年04月
16	柴山	1996年12月	42	第二海堡	1991年01月
17	柴山(港内)	2000年09月	43	アシカ島	1991年12月
18	鳥取	1979年09月	44	波浮	1973年04月
19	境港	1996年12月	45	下田	1988年04月
20	浜田	1974年03月	46	清水	1999年11月
21	藍島	1975年04月	47	御前崎	1988年04月
22	玄界灘	1980年08月	48	伊勢湾	2002年03月
23	伊王島	1974年12月	49	潮岬	1970年08月
24	熊本	2006年01月	50	神戸	1971年05月
25	名瀬	1977年03月	51	小松島	1996年12月
26	那覇	1973年07月	52	室津	1990年08月
			53	高知	1996年12月
			54	上川口	1996年12月
			55	荻田	1991年07月
			56	細島	2002年03月
			57	志布志湾	1980年04月
			58	鹿児島	1990年03月
			59	中城湾	1973年11月
			60	平良沖	2005年03月
			61	石垣沖	2005年03月

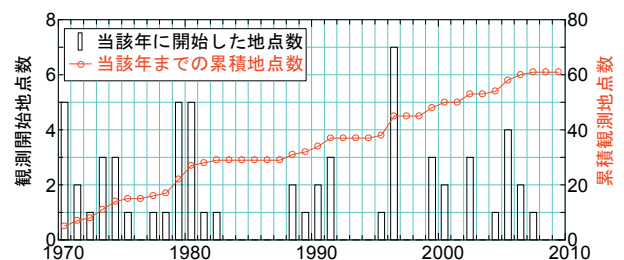


図-2.1 観測地点数の推移（GPS波浪計は除く）

表-2.2 解析対象地点

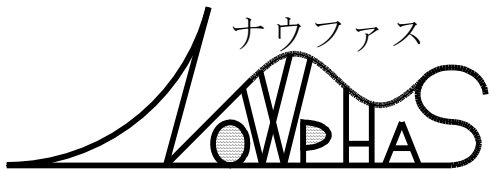
日本海側

地点名	機器	測定地点							観測期間	解析対象期間
		水深	緯度(北緯)			経度(東経)				
			°	'	"	°	'	"		
留萌	SRW	12.0	43	55	35	141	37	6	70.01 ~ 78.01	78.02~
	USW	27.0	43	56	8	141	36	26	78.02 ~ 81.04	
	USW	49.8	43	51	59	141	28	7	81.04 ~ 95.09	
	海象計	49.8	43	51	59	141	28	7	95.09 ~ 現在	
深浦	USW	30.0	40	38	59	139	54	59	79.12 ~ 81.08	79.12~
	USW	51.0	40	39	34	139	49	58	81.08 ~ 現在	
酒田	PW	15.0	38	56	45	139	48	11	70.01 ~ 73.09	73.09~
	USW	20.4	38	56	57	139	47	46	73.09 ~ 86.10	
	SRW-V, 傾斜計	45.0	39	0	31	139	46	45	87.02 ~ 96.08	
輪島	USW, 傾斜計	45.9	39	0	31	139	46	45	97.08 ~ 現在	79.01~
	USW	52.0	37	25	51	136	54	8	79.01 ~ 95.08	
	CWD	27.0	37	25	46	136	53	33	90.08 ~ 95.08	
金沢	海象計	52.0	37	25	51	136	54	8	95.09 ~ 現在	70.01~
	USW	20.0	36	38	19	136	35	14	70.01 ~ 71.05	
	USW	20.2	36	36	50	136	34	2	71.11 ~ 03.07	
鳥取	海象計	21.1	36	36	50	136	34	3	03.07 ~ 現在	79.09~
	USW	30.0	35	33	11	134	9	50	79.09 ~ 95.08	
	海象計	30.9	35	33	16	134	9	41	95.09 ~ 現在	
浜田	USW	51.1	34	54	19	132	2	11	74.03 ~ 03.08	74.03~
	海象計	50.1	34	54	19	132	2	11	03.08 ~ 現在	
藍島	USW	21.1	34	0	43	130	47	35	75.04 ~ 04.08	75.04~
	海象計	21.1	34	0	43	130	47	35	04.08 ~ 現在	
伊王島	SGW	24.0	32	43	7	129	45	19	74.12 ~ 81.06	82.11~
	USW	50.0	32	43	21	129	44	59	82.11 ~ 91.09	
	USW, CWD	31.9	32	42	59	129	45	15	92.11 ~ 現在	
名瀬	USW	54.6	28	27	7	129	31	18	77.03 ~ 現在	77.03~
那覇	USW	33.0	26	15	24	127	39	5	73.07 ~ 73.09	73.07~
	USW	52.9	26	15	28	127	38	52	73.09 ~ 現在	
	CWD	38.4	26	15	41	127	39	22	93.11 ~ 現在	

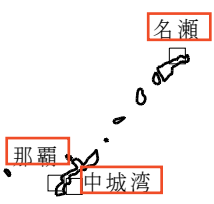
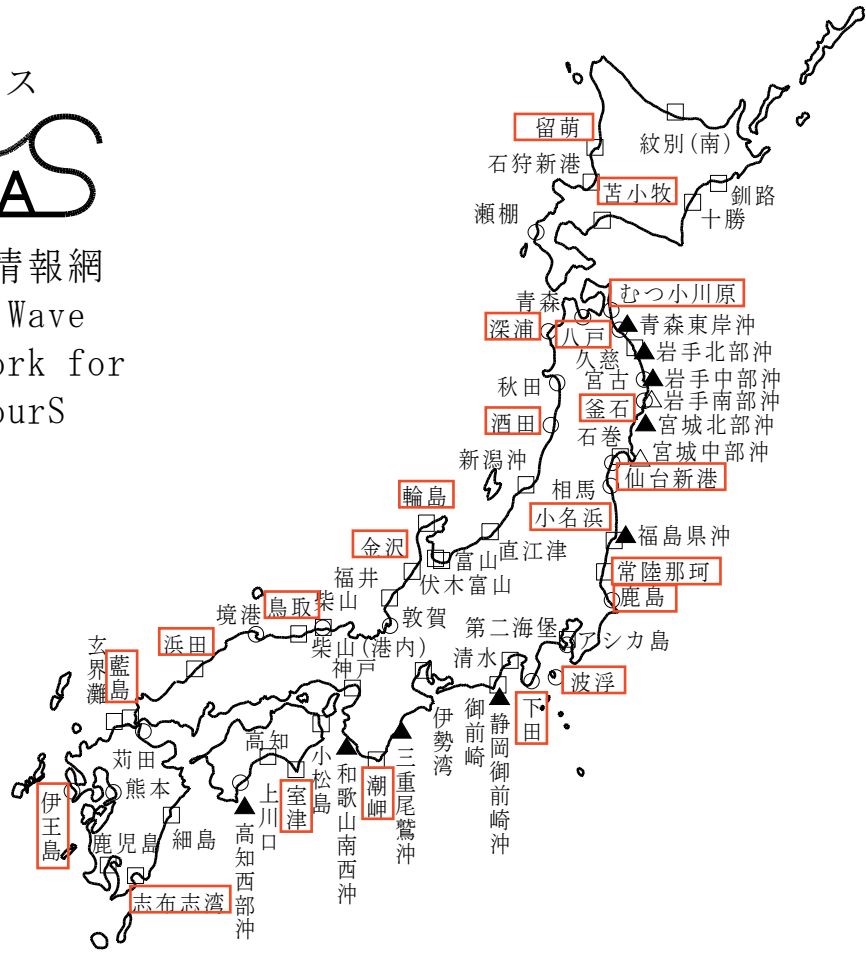
太平洋側

地点名	機器	測定地点							観測期間	解析対象期間
		水深	緯度(北緯)			経度(東経)				
			°	'	"	°	'	"		
苫小牧	SRW	13.3	42	36	45	141	36	8	70.01 ~ 77.12	78.01~
	USW	24.5	42	35	43	141	42	2	78.01 ~ 81.12	
	USW	50.7	42	32	39	141	26	46	82.03 ~ 96.03	
	海象計	50.7	42	32	39	141	26	46	96.03 ~ 現在	
むつ小川原	USW	43.8	40	55	30	141	25	27	74.04 ~ 現在	74.04~
	CWD	27.8	40	55	12	141	24	44	87.01 ~ 現在	
八戸	SGW	16.7	40	32	57	141	33	28	71.03 ~ 73.03	73.03~
	USW	21.0	40	33	11	141	32	53	73.03 ~ 88.11	
	USW, CWD	27.7	40	33	39	141	34	6	88.11 ~ 現在	
釜石	USW	49.0	39	15	54	141	56	6	78.03 ~ 80.12	78.03~
	USW	43.0	39	15	55	141	56	4	81.08 ~ 83.02	
	USW	49.8	39	15	54	141	56	6	83.06 ~ 現在	
仙台新港	USW, CWD	21.3	38	15	0	141	3	58	79.01 ~ 現在	不採用
小名浜	USW	20.0	36	54	47	140	44	0	80.01 ~ 86.03	80.01~
	USW, CWD	20.0	36	54	53	140	55	30	87.03 ~ 02.11	
	海象計	23.8	36	55	4	140	55	18	02.11 ~ 現在	
常陸那珂	USW, CWD	30.3	36	23	42	140	39	12	79.12 ~ 08.08	79.12~
	海象計	30.3	36	23	42	140	39	12	08.08 ~ 現在	
鹿島	USW	22.0	35	55	37	140	44	0	72.04 ~ 82.05	72.04~
	USW	24.0	35	53	55	140	45	14	84.03 ~ 現在	
	CWD	24.0	35	53	55	140	45	14	89.03 ~ 現在	
波浮	USW	48.3	34	40	35	139	27	8	73.04 ~ 現在	73.04~
	CWD	29.7	34	40	31	139	26	19	91.01 ~ 現在	
下田	USW	51.1	34	38	48	138	57	11	88.04 ~ 現在	88.04~
潮岬	PW	12.8	33	26	22	135	45	6	70.08 ~ 86.11	87.01~
	USW	54.7	33	25	59	135	44	50	87.01 ~ 97.08	
	海象計	54.7	33	25	59	135	44	50	98.08 ~ 現在	
室津	USW, CWD	26.8	33	16	16	134	8	52	90.08 ~ 現在	90.08~
志布志	USW	36.2	31	25	2	131	6	36	80.04 ~ 現在	80.04~
	CWD	36.2	31	25	2	131	6	36	91.11 ~ 現在	
中城湾	USW	53.0	26	13	34	127	56	29	73.11 ~ 81.08	73.11~
	USW	55.0	26	14	28	127	58	3	81.08 ~ 83.03	
	USW	50.0	26	14	29	127	58	3	83.03 ~ 94.09	
	USW	46.0	26	14	28	127	58	3	94.09 ~ 03.03	
	海象計	39.6	26	14	32	127	57	55	03.03 ~ 現在	

PW: 水圧式摺動型波高計  
 SGW: 水圧式歪抵抗型波高計  
 SRW: ステップ式波高計  
 SRW-V: 改良型ステップ式波高計  
 USW: 超音波式波高計  
 CWD: 超音波式流速計型波向計



全国港湾海洋波浪情報網  
 Nationwide Ocean Wave  
 information network for  
 Ports and HarbourS



2009 年報		
□: 海象計	: 継続観測地点	39 地点
○: USW・空中発射式	: 継続観測地点	22 地点
△: GPS 波浪計	: 継続観測地点	2 地点
▲: GPS 波浪計	: 新規観測地点	9 地点

図-2.2 2009 年末における観測地点と長期解析対象地点 (□で囲ってある地点)

本研究では、表-2.1 に示した 61 地点の中で比較的長期間の観測が実施されており、かつ日本沿岸の海域をカバーするように、解析対象地点を選択した。表-2.2 に各解析対象地点の観測機器、設置水深および設置位置（緯度、経度）、観測期間、後述の方法で決定した解析対象期間を示す。また、図-2.2 に 2009 年末現在の観測地点および解析対象地点を示す。表-2.2 から分かるように、同一の観測地点名であっても、観測機器の機種や設置位置が変更されている。なお、この表では同一機種による更新は区別していない。例えば名瀬では、1977 年 3 月から現在まで、超音波式波高計（USW）により同一地点での観測が続けられているが、1993 年 5 月に観測機器の更新が行われている。

## 2.2 波浪計の設置条件の変化

### (1) 波浪計の設置水深

表-2.2 に示したように、同一の観測地点名であっても観測期間の途中で設置水深が変化しているところがある。特に水深が浅い地点では、高波浪時に碎波することで、波浪統計量に影響する可能性がある。

図-2.3 は酒田、図-2.4 は伊王島を例に、有義波高  $H_{1/3}$ 、有義波周期  $T_{1/3}$ 、最高波高と有義波高の比  $H_{max}/H_{1/3}$ （以下波高比）のそれぞれ年平均値の経年変化を示す。図-2.3 から分かるように、特に有義波周期および波高比は、水深が 20m より浅い観測期間（1970 年～1973 年）でそれ以降より大きくなっている。図-2.4 に示した伊王島では観測期間を通じて水深 20m 以上であるものの、24.0m と比較的浅い 1974 年～1981 年では、それ以降と比較して年平均有義波高は小さく、また年平均有義波周期は大きくなっている。この原因としては、碎波の影響で高波浪時に有義波高が抑えられること、サーフビートのような長周期変動の影響により周期が大きくなっていることが考えられる。また、水圧式波高計を用いていたことから、周期の短い波を正確に捉えていなかったことも考えられる。

### (2) 波浪計周辺の地形の変化

前項(1)で示した波浪計の設置水深以外にも、防波堤の延伸、埋立地造成など波浪計周辺の地形・構造物の状況が変化し、反射・回折などによって波浪場が変化して、波浪統計量に影響を及ぼすこともある。

また、原因は不明であるが、波浪統計量が不連続に変化することもある。その例として、図-2.5 に仙台新港における年平均有義波高および年平均有義波周期の経年変化を示す。1988 年～1989 年の 2 年間にはデータの欠測が

ある。その前後の期間で、有義波高にはほとんど変化がないものの、有義波周期には 1.5s 程度のギャップが存在している。表-2.2 に示したように、この間に観測条件の変更は行われておらず、また観測機器の更新が行われた記録も無い。仙台新港では 1989 年に沖防波堤の建設着工に際して海底ケーブルの敷設替えが行われているが、沖防波堤の完成は 2004 年であり、沖防波堤の建設が有義波周期のギャップの原因とは考えにくい。

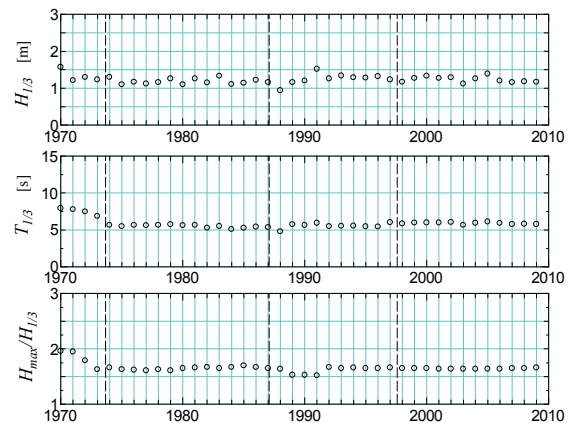


図-2.3 酒田における年平均値の経年変化

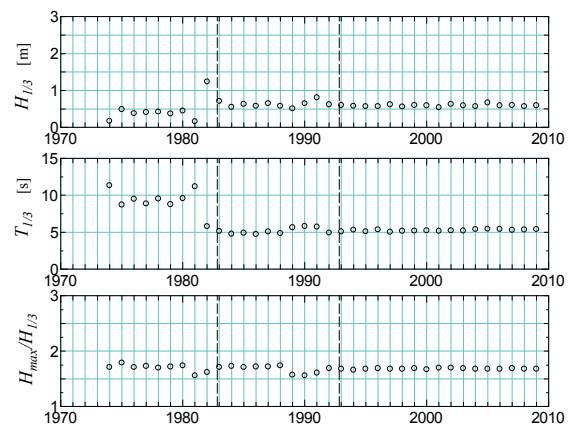


図-2.4 伊王島における年平均値の経年変化

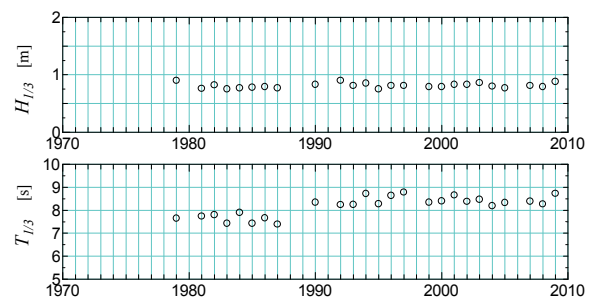


図-2.5 仙台新港における年平均値の経年変化

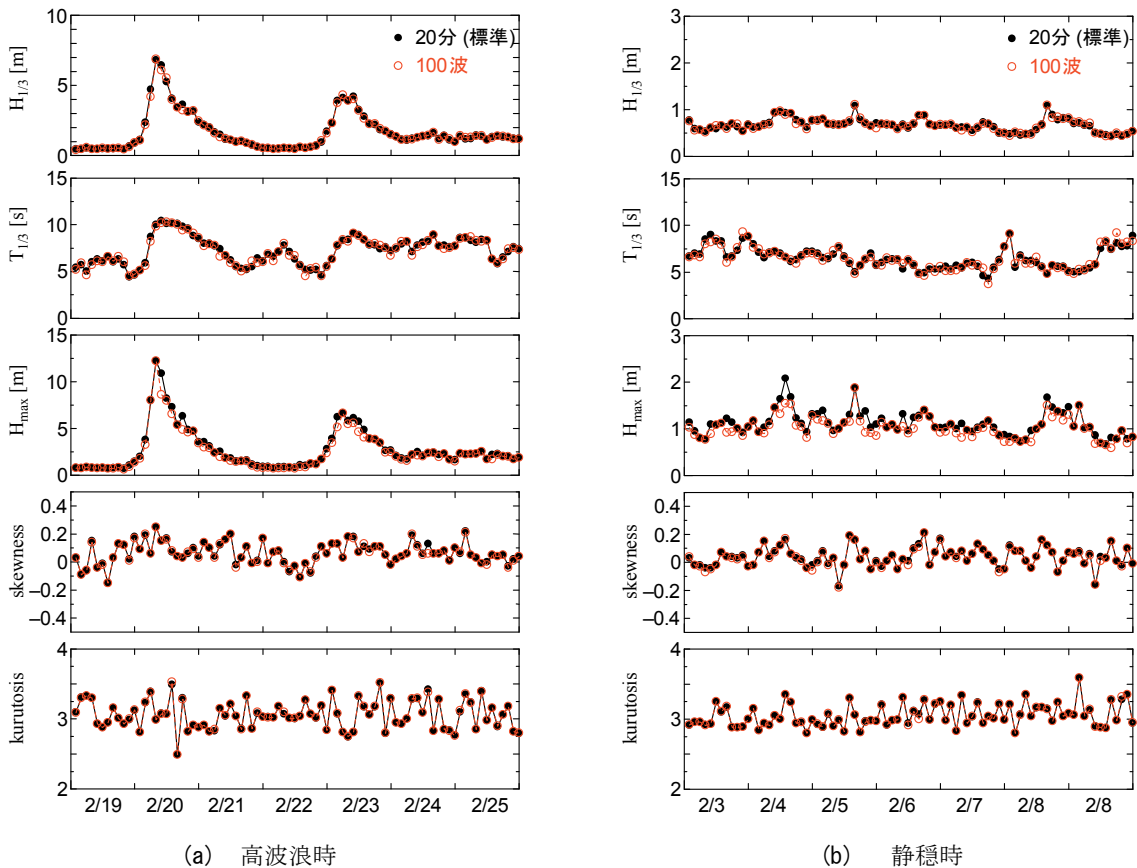


図-2.6 データ長が波浪統計量に及ぼす影響 潮岬海象計

表-2.3 データ長が波浪統計量に及ぼす影響

	評価条件	有義波高 [m]	有義波周期 [s]	波高比	水位分布の標準偏差[m]	水位分布のスキューネス	水位分布のクルトシス
高波浪時	標準(20分)	1.668	7.279	1.652	0.442	0.071	3.033
	100波	1.663	7.254	1.545	0.442	0.068	3.034
静穏時	標準(20分)	0.669	6.512	1.683	0.185	0.042	3.031
	100波	0.666	6.497	1.552	0.185	0.039	3.032

### 2.3 データ処理方法の変化

本節ではデータの処理方法の違いが波浪統計量に及ぼす影響について検討を行う。対象地点は潮岬（水深54.7m）であり、対象期間は高波浪時を含む2009年2月19日0時0分～2009年2月26日0時0分と静穏時の2009年2月3日0時0分～2009年2月10日0時0分である。これらの期間は海象計により観測された。波浪統計量としては、有義波高・周期、波高比の他に、水位分布の標準偏差、水位分布の歪度：スキューネス、水位分布の尖鋭度：クルトシスを取り上げる。なお、後述の長期統計ではデータの質を長期間にわたって統一するために毎偶数時の観測データを用いるが、本節では現在の一般的な観測形態である20分間隔による連続観測データを使用する。

#### (1) データ長が波浪統計量に及ぼす影響

現在のNOWPHASの標準的な統計処理では20分間の時系列データから波浪統計量を算定しているが、1989年～1991年においては100波を用いていた。図-2.3、図-2.4の波高比の経年変化で明らかなように、この期間は前後の期間と比較して波高比が小さい。そこで、データ長を20分（標準）および100波とした場合の2ケースについて統計値を算出し、比較を行う。

図-2.6は有義波高・周期、最高波高、水位分布のスキューネス、クルトシスについて、標準的な処理の場合と、100波で処理した場合の経時変化を示す。(a)は高波浪時、(b)は静穏時であり、図が煩雑になるのを避けるために2時間間隔にデータを間引いてプロットしている。この図から、最高波高以外の統計量については、標準的な処理

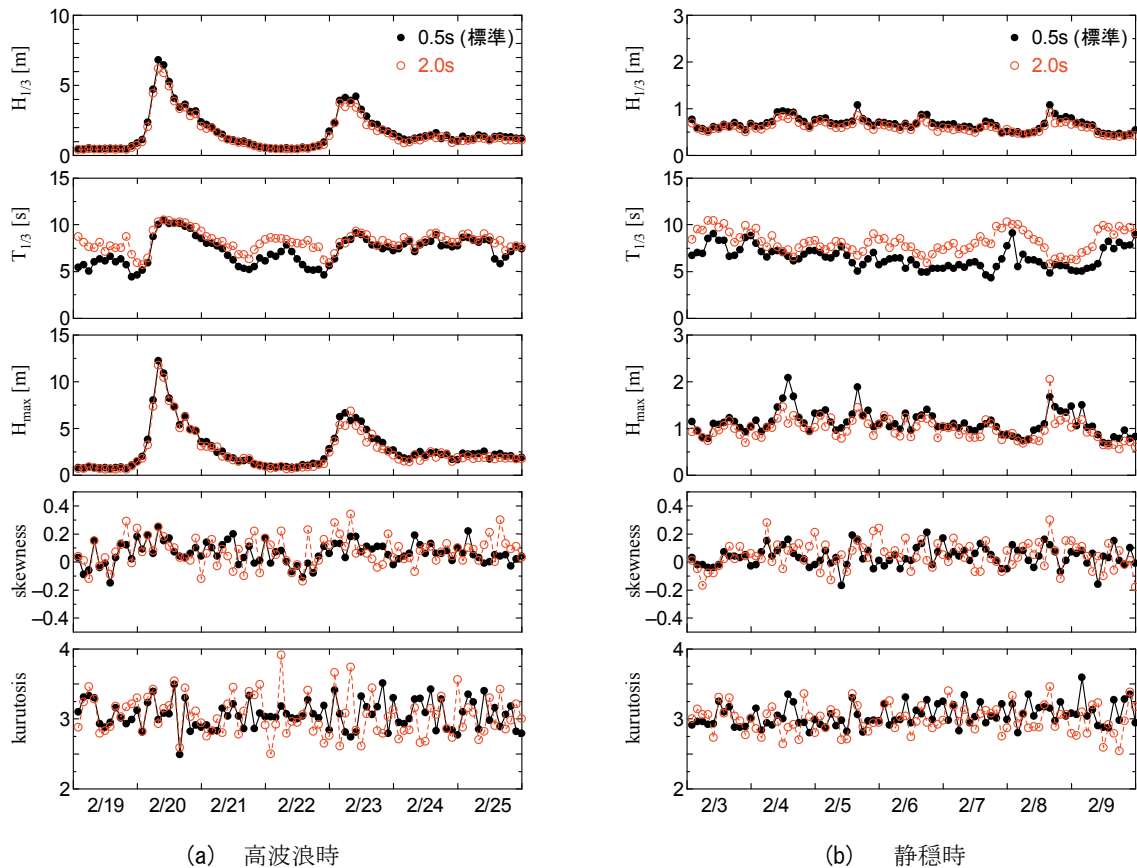


図-2.7 データ取得間隔が波浪統計量に及ぼす影響 潮岬海象計

表-2.4 データ取得間隔が波浪統計量に及ぼす影響

	評価条件	有義波高 [m]	有義波周期 [s]	波高比	水位分布の標準偏差[m]	水位分布のスキューネス	水位分布のクルトシス
高波浪時	標準(0.5秒)	1.668	7.279	1.652	0.442	0.071	3.033
	1秒	1.630	7.598	1.638	0.442	0.071	3.034
	2秒	1.510	8.145	1.638	0.443	0.073	3.030
静穏時	標準(0.5秒)	0.669	6.512	1.683	0.185	0.042	3.031
	1秒	0.649	7.118	1.645	0.185	0.043	3.030
	2秒	0.602	8.126	1.630	0.185	0.048	3.029

でも 100 波で処理しても大差はないことが分かる。

表-2.3 は図-2.6 に示した解析期間における各統計量の平均値を示す。図-2.6 で示したように、最高波高（比の分母に当たる有義波高が標準的な処理でも 100 波の処理においてもほとんど差が無いことから、表中で示した波高比に対応する）以外の統計量については、100 波以上のデータ長を使用すれば大差は発生しない。波高比は、標準的な処理による値に対して 100 波による処理では 7%程度過小評価する。なお、理論的な検討については付録に記す。

(2) データ取得間隔が波浪統計量に及ぼす影響

NOWPHAS では観測データの取得間隔（サンプリング間隔）を 0.5s としている（GPS 波浪計を除く）。ここではデータ取得間隔を 1.0s, 2.0s とした場合（0.5s 間隔のデータを間引いた場合）に、波浪統計量にどのような影響を及ぼすかについて検討する。

図-2.7 は、データ取得間隔を 0.5s とした場合と 2.0s とした場合について、有義波高・周期、最高波高、水位分布のスキューネスおよびクルトシスの経時変化を示す。(a)は高波浪時、(b)は静穏時であり、図が煩雑になるのを避けるために 2 時間間隔にデータを間引いてプロットしている。この図から分かるように、高波浪時(a)、静穏



時(b)共通して、データ取得間隔を長く(粗く)すると、水位分布のピーク(極値)を捉えにくくなり有義波高は小さくなり、また有義波周期は特に有義波高の小さい時間帯で過大評価になる。最高波高も有義波高同様に過小評価となる場合が多いが、水位のピーク値の補正(2次関数による補間、沿岸開発技術センター、2000)によりまれにデータ取得間隔が2.0sの方が波高が大きくなる場合もある。水位分布のスキューネスおよびクルトシスについては、データ取得間隔が長いと変動の振幅が大きくなる。

表-2.4には図-2.7で示した解析期間を通じた平均値を示す。図-2.7でも示したように、データ取得間隔を長くするほど有義波高は過小評価となり、逆に有義波周期は過大評価となる。特にデータ取得間隔を2.0sにすると、有義波高は10%の過小評価、有義波周期では10%の過大評価となる。有義波高、最高波高ともに過小評価となるが、波高比としても過小評価となる。水位分布の標準偏差、スキューネス、クルトシスは、平均値としては標準的な処理方法との違いはほとんどないが、図-2.7で示したように変動は大きくなる。

### (3) 水圧波形解析による補間の影響

海象計では、超音波によって水面変動を観測しているが、高波浪時または強風時に海面付近で気泡の巻き込み等が発生すると、それが波形のノイズとなる。このノイズが多く欠測とした場合には、水圧波形を表面波形に変換し、この波形で波浪統計量を求めている。

水圧波形から表面波形への変換には橋本ら(1993)による手法を用いているが、伝達関数の境界周波数を適切に決定する必要がある。NOWPHASによるデータ処理では、超音波による観測値が欠測していない時間帯で、水圧波形から算出した有義波高が超音波による有義波高に

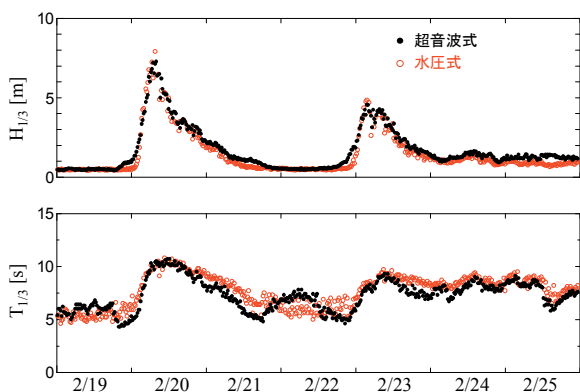


図-2.8 海象計の超音波と水圧による波形から求めた有義波高・周期の経時変化

ほぼ一致するように、試行錯誤で伝達関数を決定している。

図-2.8は、潮岬の海象計で得た2009年2月19日0時0分~2009年2月26日0時0分(前項の高波浪時に対応)の波浪統計量について、超音波による表面波形から求めたものと水圧波形から表面波形に換算して求めたものとを比較したものである。高波浪時の最大有義波高を一致させるように伝達関数を調整するため、波高が大きい時間帯では水圧波形による有義波高・周期の精度は良いが、この例では波高が増大し始める時間帯では波高を過小評価、周期を過大評価している。伝達関数は観測地点、高波擾乱毎に調整しており、必ずしもこの過大・過小評価が一般的な傾向であるとは限らない。

## 2.4 本研究における統計解析の基本方針

2.2, 2.3節で述べたように、波浪統計量は波浪計の設置条件(水深、周辺条件)やデータの処理方法、さらに本論文では述べないが、観測機器の種類によっても異なると思われる。そこで本研究では、図-2.3に示したような波浪統計量の経年変化図を作成し、何らかの条件が変化した年代の波浪統計量にギャップが無いか確認し、ギャップがある場合はそれを避けて解析期間を設定した。各地点の解析対象期間を表-2.2に併せて示す。なお、2.3.(1)で指摘した100波による統計期間である1989年~1991年については、有義波への影響は小さいので統計期間に含めている。

また、統計処理に使用するデータの質の偏りを防ぐ目的で、データ測得率が50%未満の月がある場合には、その季節あるいは年の統計量は算出していない。NOWPHASの観測間隔は、当初は毎偶数時のみであったが、2000年代からは20分間隔となった。本研究では経年変化を議論するために毎偶数時のデータに統一する。さらに、海象計による観測期間では水圧データに基づく補間データは使用せず、超音波による観測が欠測した場合はデータ欠測として取り扱う。季節区分はNOWPHASで標準的に用いられているように冬季:前年12月~2月、春季:3月~5月、夏季:6月~8月、秋季:9月~11月とする。

## 3. 季節別平均値の経年変化傾向

清水ら(2006)は、NOWPHASの10地点(留萌、酒田、金沢、浜田、那覇、苫小牧、むつ小川原、波浮、潮岬、中城湾)を対象に1970年~2004年の35年分のデータを解析し、年平均有義波高に関しては±10%の範囲の

年変動があるものの、顕著な経年変化傾向は見られないとしている。また、間瀬ら(2009)は、日本海沿岸の9地点(留萌、瀬棚、深浦、酒田、輪島、金沢、福井、鳥取、浜田)を対象に冬型気圧配置による擾乱に着目して20~30年分のデータによる長期統計解析を行った。その中で、年平均有義波高はどの地点もほとんど変化していないこと、有義波周期はほとんどの地点で増加傾向を示していることを指摘した。ただし、両者の論文では、棄却検定など客観的な判断まではしていない。

本章では、有義波高・周期、静穏率および波パワーの4つの指標について、季節別および通年の平均値とその経年変化傾向について検討する。経年変化傾向は直線回帰分析および棄却検定を用いて客観的に評価する。また、波向観測が比較的長期間行われている観測地点については、卓越波向を算出し、その季節別変動と経年変化傾向についても整理する。

### 3.1 有義波高

初めに有義波高について検討する。図-3.1には解析期間全体で平均した季節別および通年の平均有義波高を示す。一種の平年値と考えて良い。日本海側の留萌から藍島では、冬季風浪に伴う高波浪が顕著であり、冬季の平均値は年平均値の約2倍、夏季と比較すると4倍程度の値となっている。南西諸島の名瀬と那覇は、東シナ海に面しているが冬季風浪の傾向が顕著に現れている。これらの地点に対し、太平洋側の季節変動は小さい。

図-3.2には平均有義波高の経年変化が有意と判断された地点とその変化率を示す。ここでは、まず各種統計資料に対して直線回帰分析を行い、さらに畑田ら(2002)に倣って経年変化率(勾配値)に対するt片側検定を行い、統計的有意性を評価した。この図には有意水準5%の棄却検定で有意と判断された値のみを示している。例えば、藍島の通年値の変化率は0.004m/年であるがこれは解析対象期間35年(1975年~2009年)で0.14m程度の増加傾向であったことを示している。

平均有義波高の経年変化が有意と判断される地点は少ない。通年値では、藍島、むつ小川原、常陸那珂、中城湾では増加傾向、波浮では減少傾向を示しており、経年変化傾向が有意な地点は太平洋側に多い。季節別に見ると、藍島と中城湾は3つの季節で増加傾向を示している。特定の季節のみ変化傾向を示す地点は、日本海側の深浦、金沢、伊王島で、春季もしくは夏季のみ増加傾向を、太平洋側では八戸で春季、潮岬で冬季のみ増加傾向を示している。

### 3.2 有義波周期

図-3.3には解析期間全体で平均した季節別および通年の平均有義波周期を示す。有義波高と同様に、日本海側の留萌から藍島では冬季風浪により冬季の平均有義波周期は夏季と比較して1.3倍程度に大きくなるが、太平洋側の季節変動は小さい。年間を通じて日本海側の平均有義波周期は太平洋側より2s程度短い、これは日本海側の吹送距離が限られているためである。

平均有義波周期の経年変化が有意と判断された地点とその変化率を図-3.4に示す。図-3.2で示した平均有義波高と比較すると、有意な経年変化傾向を示している地点が多く、有意な変化傾向が見られる地点では下田の春季を除くと何れも増加傾向を示している。

地域別に見ると、日本海北部の深浦、酒田、金沢では春季、夏季で増加傾向を示している。東シナ海に面した藍島、名瀬では、3つの季節で増加傾向を示している。太平洋側では苫小牧から常陸那珂の北部沿岸に増加傾向が現れており、潮岬、室津、志布志、中城湾では有意な傾向は現れていない。つまり、台風よりも温帯低気圧の影響が大きい地方で増加傾向を示している。

図-3.2と図-3.4を比較すると、通年値で平均有義波高も平均有義波周期も増加傾向を示しているのは藍島、むつ小川原、常陸那珂の3地点である。また、中城湾は平均有義波高のみが有意な増加傾向を示し、逆に太平洋側の北部沿岸ではむつ小川原を除き平均有義波周期のみに有意な増加傾向が現れている。

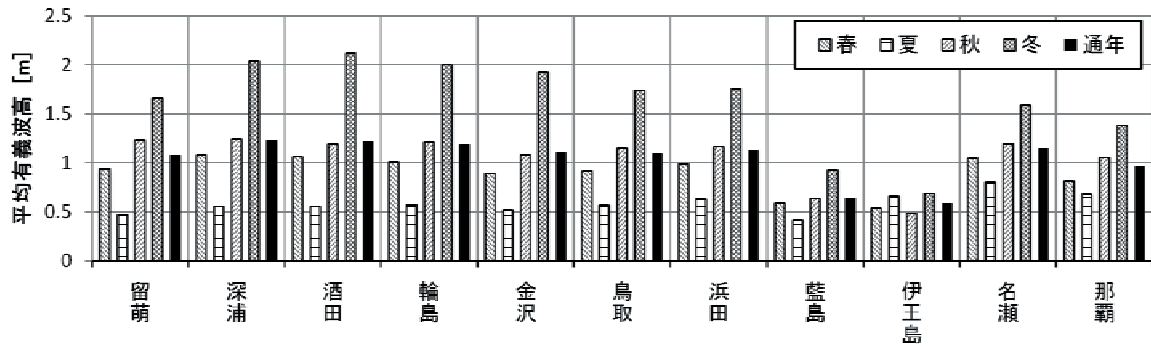
### 3.3 静穏率

本研究では、有義波高があるしきい値以下となる割合を静穏率と定義する。この指標は海上工事や荷役作業の判断材料となる。そのしきい値としては、海上工事の安全管理にしばしば使用されている1.0mを仮定した。

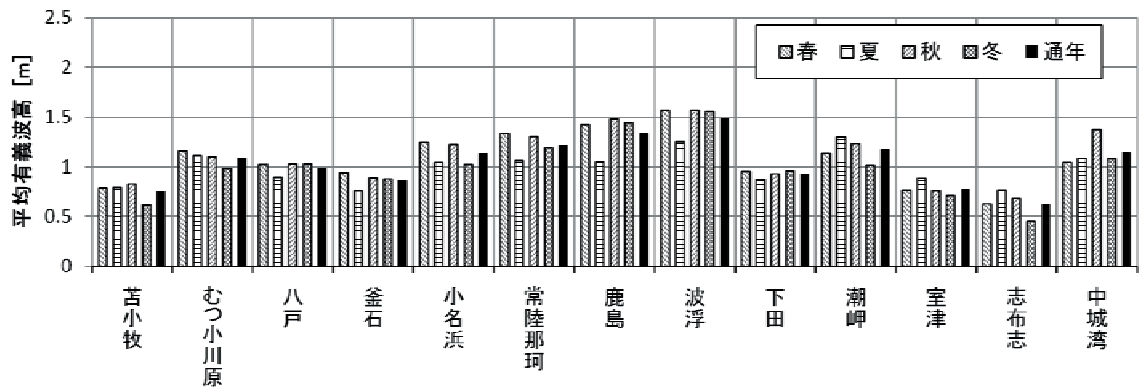
図-3.5に観測期間全体で平均した季節別および通年の平均静穏率を示す。また、図-3.6には静穏率の経年変化が有意と判断された地点とその変化率を示す。静穏率は当然のことながら有義波高とは逆の傾向を示すことになり、日本海側の留萌から浜田では夏季に静穏率が高く、冬季は夏季に比べて1/3程度に低下する。太平洋側では有義波高と同様に季節変動は小さい。

図-3.6に示した静穏率の経年変化率も平均有義波高と逆の傾向を示す地点が多く、通年値で平均有義波高が有意な増加傾向を示していた藍島、むつ小川原、常陸那珂、中城湾、さらに平均有義波高では有意な傾向を示していないが八戸において、静穏率は低下傾向を示している。



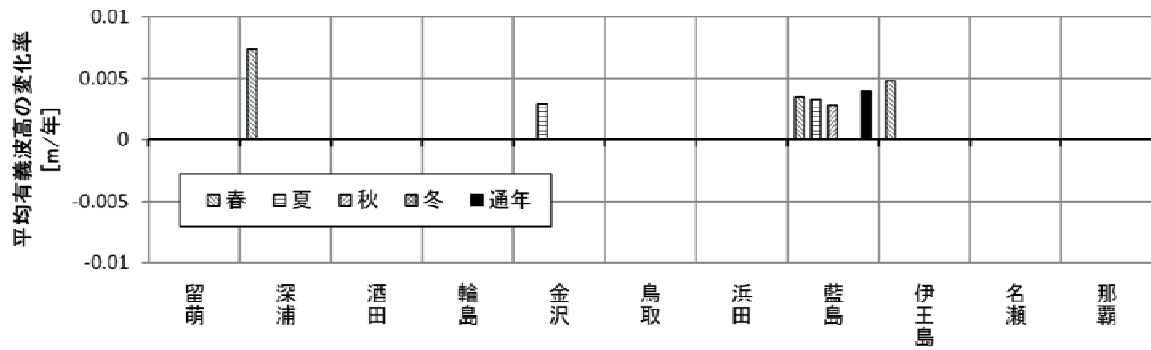


(a) 日本海側

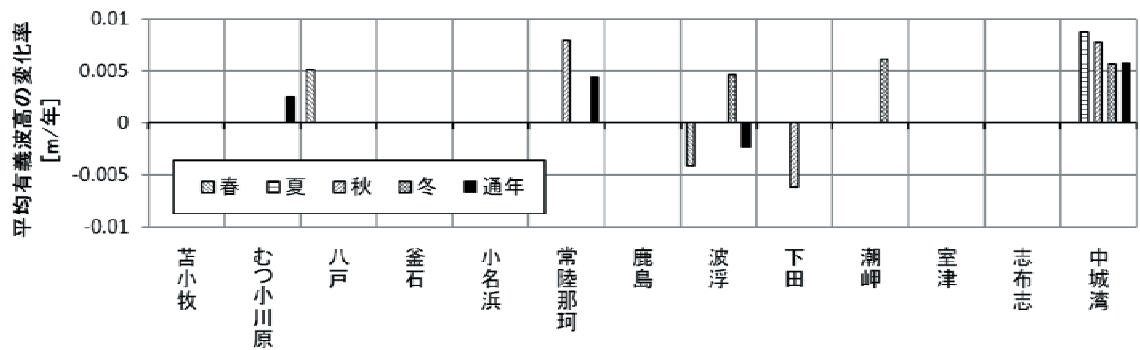


(b) 太平洋側

図-3.1 解析期間全体の平均有義波高

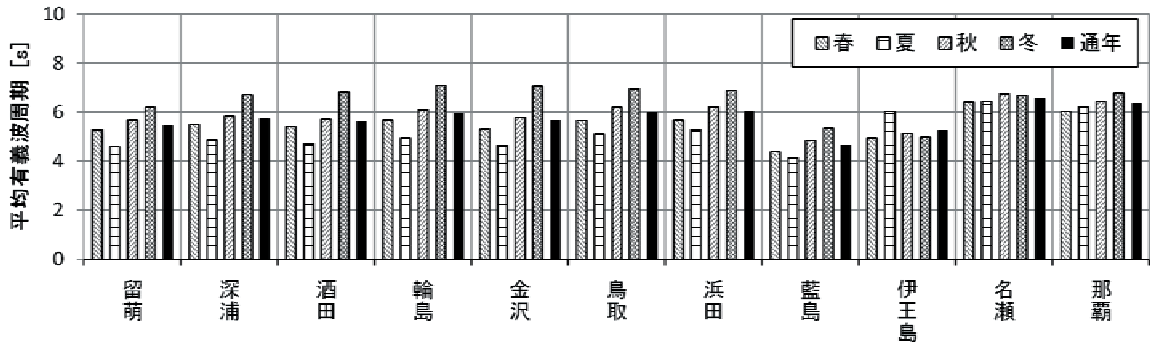


(a) 日本海側

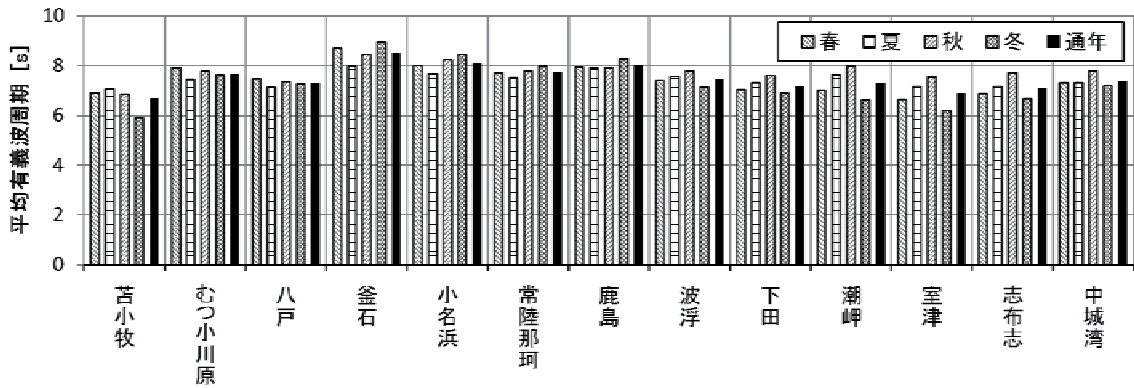


(b) 太平洋側

図-3.2 平均有義波高の経年変化が有意と判断された地点とその変化率

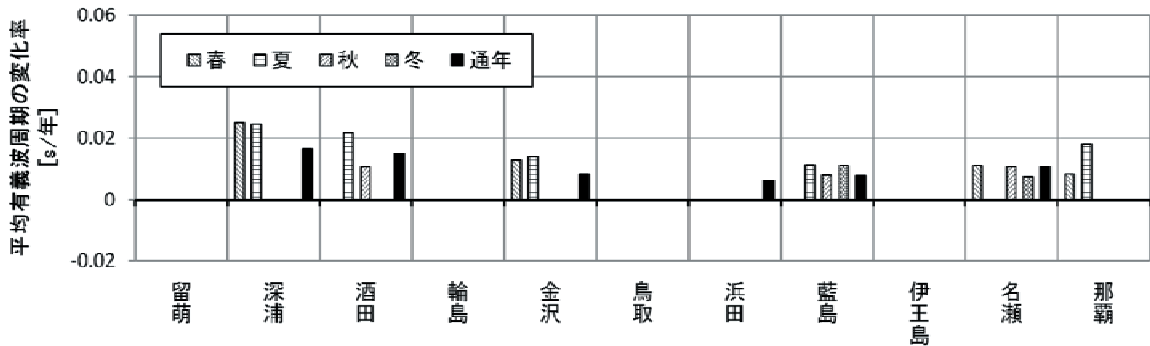


(a) 日本海側

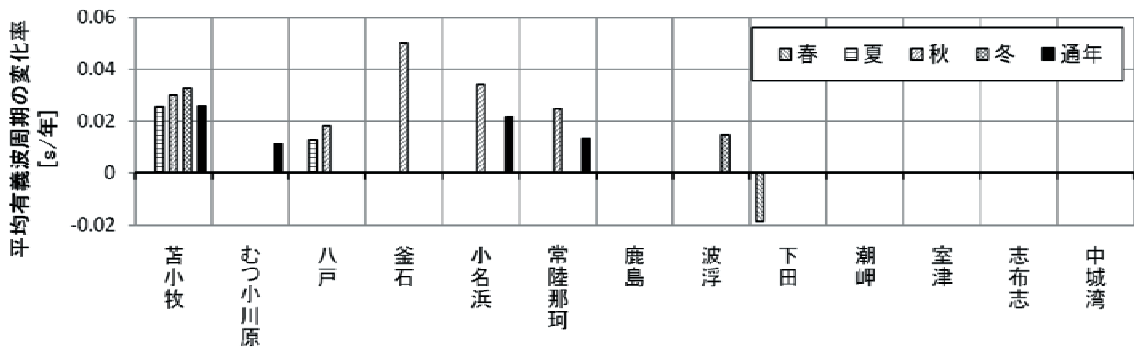


(b) 太平洋側

図-3.3 解析期間全体の平均有義波周期

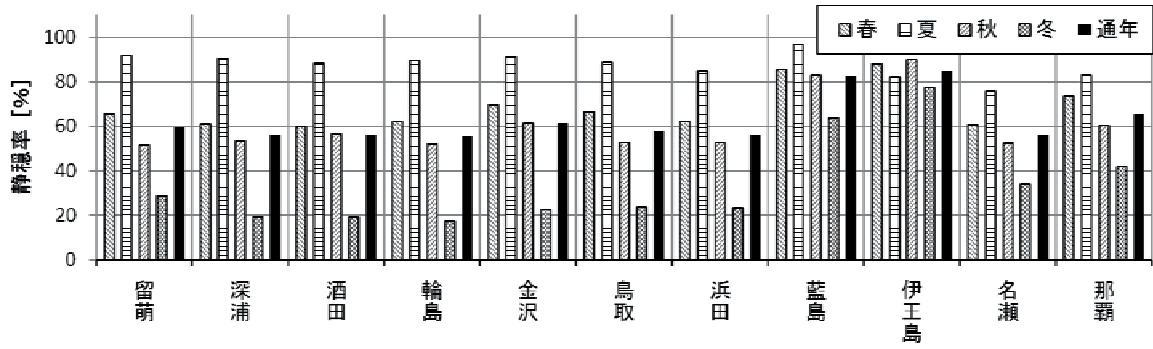


(a) 日本海側

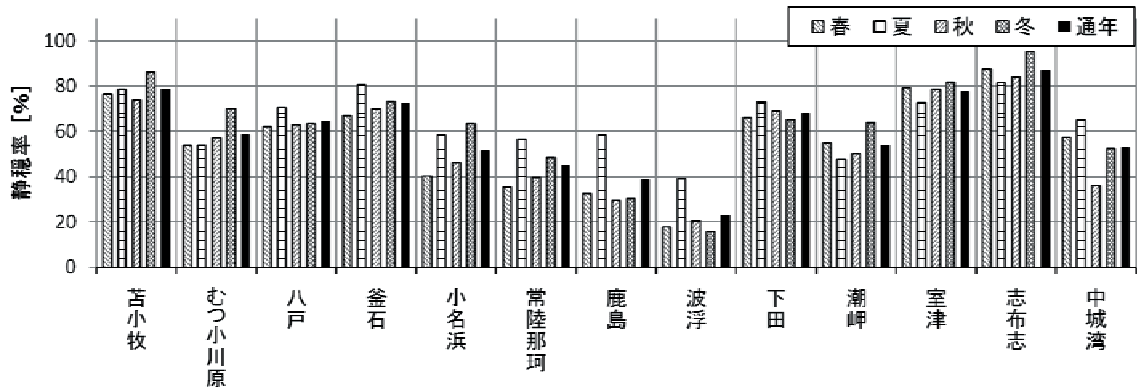


(b) 太平洋側

図-3.4 平均有義波周期の経年変化が有意と判断された地点とその変化率

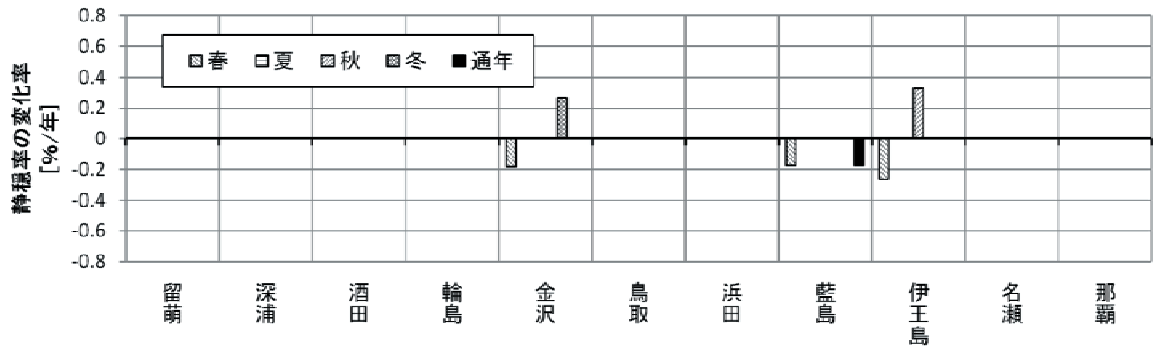


(a) 日本海側

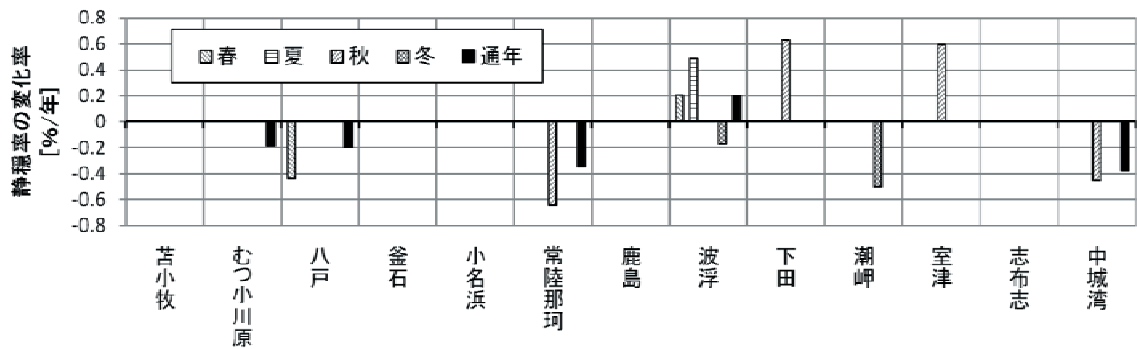


(b) 太平洋側

図-3.5 解析期間全体の静穏率の平均値



(a) 日本海側



(b) 太平洋側

図-3.6 静穏率の経年変化が有意と判断された地点とその変化率

### 3.4 波パワー

波パワーは、単位時間単位幅当たりの波のエネルギーフラックスに相当するものであり、波力発電の計画や海洋生物の生育条件など環境分野にも応用されている指標の一つである。波パワーの算出方法は高橋ら(1989)、永井ら(1998)に倣い、以下のように考えた。

波パワーは、微小振幅波理論から式(1)で与えられる。

$$WP = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (1)$$

ここで、 $WP$ は波パワーであり、 $\text{kgm/s}^3$ 、すなわち  $W$  (ワット) /  $m$  の単位を有する次元量である。また、 $\rho$ は海水の密度 ( $=1030\text{kg/m}^3$ )、 $g$  は重力加速度 ( $9.8\text{m/s}^2$ )、 $H$  は来襲する波の波高 (単位は  $m$ )、 $C_g$  は波の群速度 (単位は  $m/s$ ) である。

本研究で対象とした NOWPHAS の観測地点の水深は  $20\sim 50m$  程度であり、必ずしも深海波すなわち沖波を観測しているとは言えないが、ここでは浅水変形の影響を無視して式 (1) を簡略化する。深海波の条件では波の群速度  $C_g$  は次式で近似される。

$$C_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (2)$$

ここで、 $T$ は波の周期 (単位は  $s$ ) である。

式 (1) に式 (2) を代入し、係数を簡略化すると  $WP$  は以下の式で近似できる。

$$WP = \frac{1}{32} \rho g^2 H^2 T = 984 H^2 T (\text{W/m}) \quad (3)$$

$$\approx 1.0 H^2 T (\text{kW/m})$$

この式は単一方向の規則波に対する式であり、不規則波に対してはそのまま適用することは出来ない。そこで以下に示すような仮定の下、式 (3) 中の波高  $H$  と周期  $T$  を有義波高  $H_{1/3}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  に置き換える。

個々波の周期と波向の分布については無視し、全ての個々波の周期は有義波周期と一致し、波向は直入射と仮定する。さらに個々波の波高分布は線形重ね合わせの理論から次式を用いて近似する。

$$H_{1/3} = 4(m_0)^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 $m_0$ は周波数スペクトルの0次モーメントであり、エネルギー平均波高  $H_B$  との間に次式の関係がある。

$$m_0 = \frac{H_B^2}{8} \quad (5)$$

式 (4) および式 (5) から、有義波高  $H_{1/3}$  とエネルギー平均波高  $H_B$  との関係は以下の式で表される。

$$H_B^2 = \frac{H_{1/3}^2}{2} \quad (6)$$

エネルギー平均波高  $H_B$  は波パワーの平均値を与える波高であるため、式 (3) における波高  $H$  と等価なパラメータである。つまり、式 (6) および個々波の周期が有義波周期に等しいという仮定の下に、波パワーの算定式は式 (3) と有義波高  $H_{1/3}$ 、有義波周期  $T_{1/3}$  を用いて以下のようなになる。

$$WP = 0.5 H_{1/3}^2 T_{1/3} (\text{kW/m}) \quad (7)$$

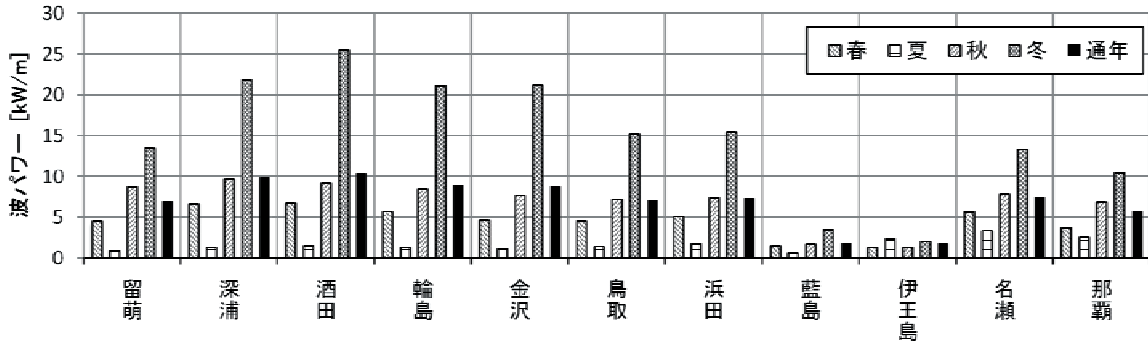
図-3.7 に観測期間全体で平均した季節別および通年の波パワーを示す。また、図-3.8 には波パワーの経年変化が有意と判断された地点とその変化率を示す。波パワーは、式 (7) から分かるように、有義波高の2乗および有義波周期に比例する指標である。そのため、日本海側では冬季風浪によって冬季の平均値は、夏季の平均値の10倍程度、通年の平均値に比べても2倍の値となる。太平洋側では、日本海側と比較して季節変動は小さいものの、特に北部沿岸では春季に大きくなる。

図-3.8 に示した経年変化率について見ると、輪島の秋季、波浮の春季を除き有意な変化のある地点では増加傾向を示している。通年平均値では、藍島、名瀬、苫小牧、小名浜、常陸那珂、潮岬、中城湾で増加傾向を示しており、日本海側、太平洋側ともに南方の地域を中心に増加傾向を示す地点がある。

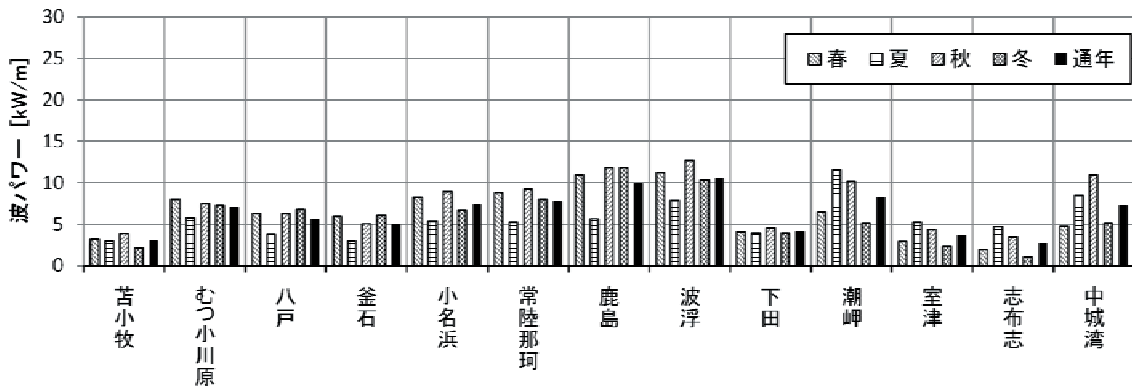
### 3.5 卓越波向

NOWPHASの波浪観測地点には波向の観測を行っている地点もある。本節では表-2.2で示した解析対象地点から、10年以上波向を計測しており、かつ屈折の影響が比較的小さい水深30m以上の観測地点を対象として、卓越波向を算出した。表-3.1に卓越波向の検討地点を示す。なお、常陸那珂では観測開始当初の1979年12月より波向観測が行われているが、永井(2002)に倣い、波向出現頻度統計が港湾技研資料に掲載されるようになった1991年以降を対象とした。

表-3.2には表-3.1で示した日本海側5地点、太平洋側4地点について卓越波向を16方位で調べた結果を示す。苫小牧において、2003年を境にSSEからSEへと卓越波向が変化しているように見えるが、これは2003年を境にそれ以降の期間のデータで波向計の設置方位を補正した結果である。輪島や那覇では冬季風浪もしくは台風の影響によって、卓越波向の季節変動は存在する。しかしながら、今回検討を行った9地点では卓越波向の経年変化傾向は見られなかった。

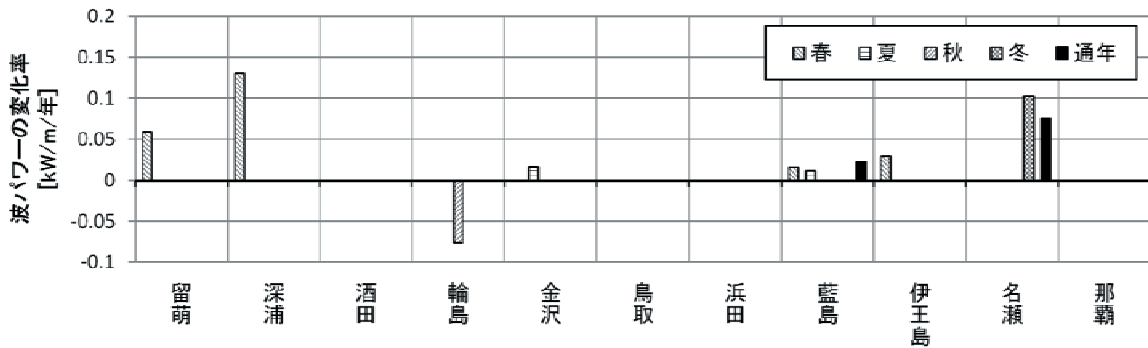


(a) 日本海側

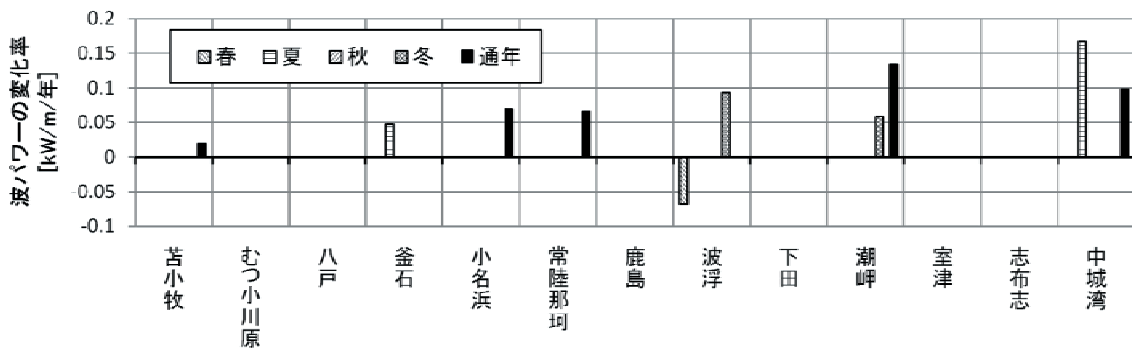


(b) 太平洋側

図-3.7 解析期間全体の波パワーの平均値



(a) 日本海側



(b) 太平洋側

図-3.8 波パワーの経年変化が有意と判断された地点とその変化率

表-3.1 卓越波向の検討地点

日本海側												
地点名	機器	測定地点						期間				
		水深 [m]	緯度(北緯)			経度(東経)						
		°	'	"	°	'	"					
留萌	海象計	49.8	43	51	59	141	28	7	95.09 ~ 現在			
輪島	海象計	52.0	37	25	51	136	54	8	95.09 ~ 現在			
鳥取	海象計	30.9	35	33	16	134	9	41	95.09 ~ 現在			
伊王島	USW, CWD	31.9	32	42	59	129	45	15	92.11 ~ 現在			
那覇	USW,CWD	38.4	26	15	41	127	39	22	93.11 ~ 現在			

太平洋側												
地点名	機器	測定地点						期間				
		水深 [m]	緯度(北緯)			経度(東経)						
		°	'	"	°	'	"					
苫小牧	海象計	50.7	42	32	39	141	26	46	96.03 ~ 現在			
常陸那珂	USW, CWD	30.3	36	23	42	140	39	12	79.12 ~ 08.08			
潮岬	海象計	54.7	33	25	59	135	44	50	98.08 ~ 現在			
志布志	USW,CWD	36.2	31	25	2	131	6	36	91.11 ~ 現在			

表-3.2 卓越波向の整理結果 (×は波向測得率 50%以下)

日本海側																				
地点名	季節	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
留萌	春					×	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	WSW	WSW	W	
	夏					×	WNW	WNW	W	WSW	W	WSW	WSW	×	W	W	WSW	WSW	WSW	
	秋					WNW	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	
	冬					WNW	N	W	WNW	W	WNW	WNW	W	W	W	W	W	W	W	
	通年					×	WNW	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	
輪島	春						NNW	WNW	NNE	NNE	×	WNW	×	NNE	WNW	NNE	NNE	NNE	NNE	
	夏						N	NNE	NNE	N	W	NNE	N	NNE	NNE	N	NNE	NNE	NNE	
	秋						N	NNE	NW	NW	NW	NNE	NNE	NW	NNE	NNW	NNE	NNE	NW	
	冬						NNE	×	NW	NW	NW	NNW	NW	NW	NNW	NNW	NW	NNE	NW	
	通年						NNW	NNE	NNE	NW	NW	NNE	N	NNE	NNW	NNW	NNE	NNE	NNE	
鳥取	春					×	NNE	WNW	NNE	NNE	WNW	×	NNE	NNE	WNW	NNE	NNE	NNE	NNE	
	夏					×	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	×	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	
	秋					×	NNW	NNE	NNE	NNE	×	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	×	
	冬					N	NNW	N	NNW	N	×	NNW	N	N	N	N	N	N	N	×
	通年					×	NNE	N	NNE	NNE	NNE	×	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE
伊王島	春		×	×	×	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	×	SW	SW	SW	
	夏		×	×	×	SW	SW	×	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	×	SW	SW	SW	
	秋		×	×	×	SW	SW	WSW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	
	冬		×	WSW	×	WSW	SW	WSW	SW	WSW	WSW	SW	SW	SW	SW	WSW	SW	WSW	WSW	
	通年		×	×	×	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	×	SW	SW	SW	
那覇	春			×	NW	×	×	×	WSW	NNW	NNW	NNW	×	NNW	NNW	NNW	NNW	NNW	SW	
	夏			×	×	×	×	×	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	SW	
	秋			×	×	×	NW	×	NNW	NNW	NNW	NNW	NNW	×	NNW	NNW	NNW	NNW	SW	
	冬			NW	×	×	NW	×	NNW	NNW	NNW	×	NNW	NNW	NNW	NNW	NNW	NNW	NNW	
	通年			×	×	×	×	×	NNW	NNW	NNW	NNW	×	NNW	NNW	NNW	NNW	NNW	SW	

太平洋側																			
地点名	季節	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
苫小牧	春						×	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SE	SSE	SE	SE	SE	SE
	夏						SE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
	秋						SE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SE	SSE	SE	SE	SE	SE
	冬						SE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SE	SSE	SSE	SE	SE	SSE
	通年						×	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SE	SSE	SE	SE	SE	SE
常陸那珂	春	E	E	×	E	×	E	E	ESE	E	E	E	E	E	E	E	E	E	ESE
	夏	E	E	×	E	E	E	E	ESE	E	E	E	E	E	E	ESE	E	ESE	ESE
	秋	E	E	×	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	×	E	E	E
	冬	E	E	ENE	ENE	ENE	NE	E	E	ENE	E	ENE	E	ENE	ENE	×	E	ENE	ESE
	通年	E	E	×	E	E	E	ESE	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
潮岬	春								SE	SSE	SE	SE	ESE	SE	SE	SE	SE	SSE	SE
	夏								×	SSW	SE	SSW	×	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	S
	秋								×	SE	SE	SE	×	ESE	SE	SSE	SSE	S	
	冬								×	SSE	SE	×	SSE	SE	ESE	SSE	S	SE	
	通年								×	SSE	SE	SE	×	SSE	SE	SE	SE	SSE	SE
志布志	春		×	×	SE	×	SE	×	SE	SE	SE	SE	ESE	×	SE	SE	SE	SE	SE
	夏		×	×	SE	×	SE	SE	SE	SE	SE	SE	×	SE	SE	×	SE	SE	SE
	秋		SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	×	SE	SE	×	SE	SE	SE
	冬		SE	SE	×	SE	×	×	SE	SE	SE	SE	×	SE	SE	×	SE	SE	SE
	通年		×	×	SE	×	SE	×	SE	SE	SE	SE	×	SE	SE	×	SE	SE	SE

## 4. 季節別最大値の経年変化傾向

最大有義波高の経年変化傾向に関する既往の研究としては、間瀬ら（2009）が日本海沿岸の冬型気圧配置に伴う高波の観測データを解析し、年最大有義波高および高位平均有義波高に経年変化傾向があることを指摘している。ただし、増加傾向を示す地点と減少傾向を示す地点の両方が存在する。

清水ら（2006）は、高波の発生頻度に着目した解析を行い、5年毎の発生頻度を整理した結果、台風の影響が大きい潮岬、中城湾において高波発生頻度が増加傾向にあることを指摘している。

また、平石ら（2008）は、むつ小川原、酒田、潮岬、那覇の4地点において、異なる観測期間の年最大値資料および極大値資料を用いて確率波高を算定した。その結果、1970年～1989年のデータを用いた50年確率波高に比べて、最近の1990年～2005年のデータを用いた50年確率波高が1～2m大きくなることを指摘している。

本章では季節別および通年の最大有義波および最大最高波について検討する。

### 4.1 最大有義波

図-4.1に季節別および通年の最大有義波高の平均値を示す。また、図-4.2に最大有義波高の経年変化が有意と判断された地点とその変化率を示す。

日本海側では、当然のことながら冬季風浪の影響により、冬季の平均値が大きい。図-3.1で示した平均有義波高と比較して秋季と冬季の差が小さいことが分かる。これは、今回の検討で秋季に含めた11月に、日本海側で南岸低気圧もしくは冬型気圧配置による高波が発生する可能性があるためである（例えば河合ら、2011）。また、太平洋側においても苫小牧から釜石では冬季が年間を通じて最大となっている。一方で太平洋側南部の潮岬から中城湾では台風の影響により夏季・秋季に大きくなる。

図-4.2に示した最大有義波高の経年変化率を図-3.2で示した平均有義波高と比較すると、むつ小川原では通年の平均有義波高も最大有義波高も増加傾向を示しているが、平均有義波高と最大有義波高の経年変化傾向の一致しない地点の方が多い。通年で最大有義波高のみが増加傾向を示している地点としては、酒田、名瀬、八戸がある。季節別に最大有義波高の経年変化を見ると、日本海側では冬季に、東北太平洋沿岸では秋季にそれぞれ増加傾向を示す地点がある。

図-4.3に最大有義波周期の平均値、図-4.4に最大有義

波周期の経年変化が有意と判断された地点とその変化率を示す。最大有義波周期も、図-4.1で示した最大有義波高と同様に、日本海側の秋季の値は冬季とほぼ同じ程度となっている。伊王島や藍島では秋季の値の方が大きい。太平洋側では台風の影響を受けやすい下田から中城湾にかけての地域で季節変化が見られ、夏季・秋季において最大有義波周期が長くなる。

図-4.4に示した経年変化傾向において、通年値で酒田、名瀬、むつ小川原、中城湾では通年値で有意な増加を示している。地域的もしくは季節的な特徴は見られない。

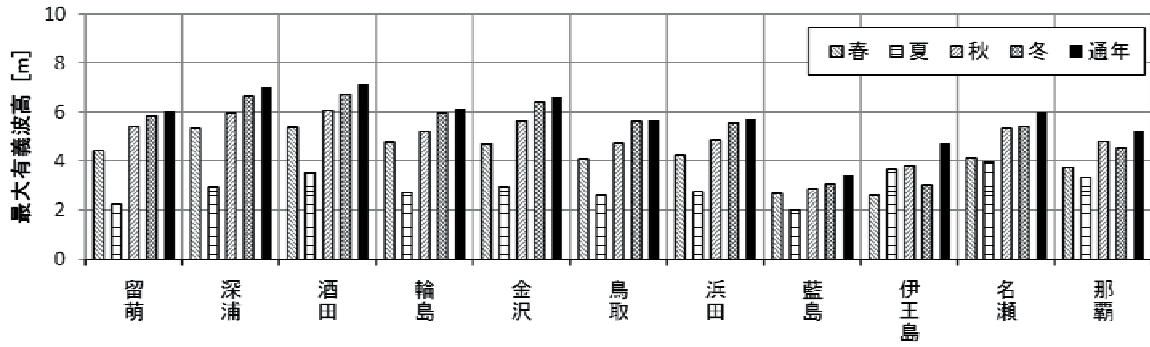
### 4.2 最大最高波

本節では季節および年間の最大の最高波に関して議論を行う。最高波とは20分間に含まれる個々波の中で最大の波高を示したものの波高（最高波高）および周期（最高波周期）である。最大最高波はその最高波の季節毎の最大値である。多くの個々波を平均して求める有義波とは異なり、データ欠測の影響を受けやすい。また、2.3.(1)で指摘したようにデータ長にも影響されるため、特に経年変化率の評価においては注意が必要である。

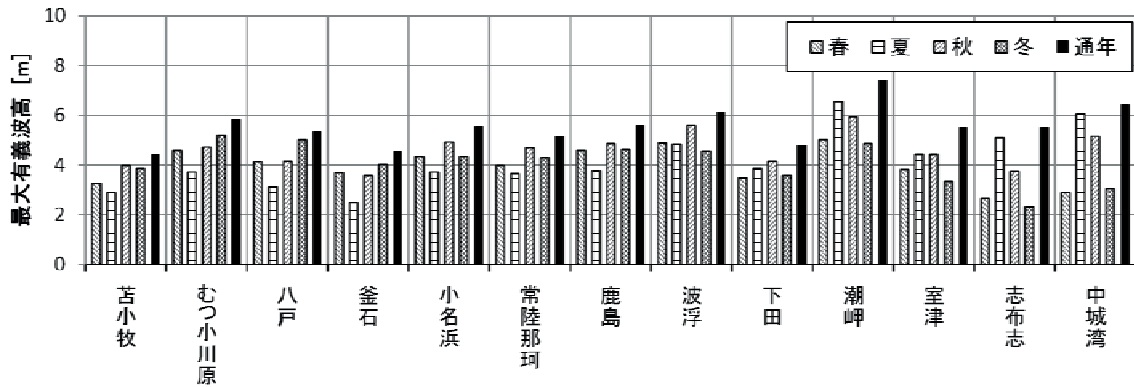
図-4.5に解析期間全体を通じて平均した通年および季節別の最大最高波高、図-4.6にその経年変化が有意と判断された地点とその変化率を示す。最大最高波高は最大有義波高の傾向とよく一致しており、日本海側では秋季・冬季で大きくなり、太平洋側でも苫小牧から釜石にかけての地域では秋季・冬季に大きくなる。一方で太平洋側の波浮から中城湾では台風の影響により夏季・秋季に大きくなる。

図-4.6に示した経年変化率も最大有義波高の傾向とよく一致しているが、通年値で見ると増加傾向を示す地点は、最大有義波高に比べて多く、日本海側では酒田、金沢、藍島、名瀬、太平洋側では苫小牧、八戸、小名浜、中城湾で有意な増加傾向を示している。

図-4.7には解析対象期間を通じて平均した最大最高波周期、図-4.8にはその経年変化が有意と判断された地点とその変化率を示す。最大最高波周期も最大有義波周期と同様に、日本海側では秋季と冬季がほぼ同じ程度の値となっている。太平洋側では苫小牧から釜石で冬季に大きくなり、台風の影響を受けやすい波浮から中城湾では夏季・秋季に大きくなっている。図-4.8に示した経年変化率において、通年で増加傾向を示すのは名瀬のみであり、有意な経年変化傾向を示す地点は少なく、地域的もしくは季節的な特徴は見られない。

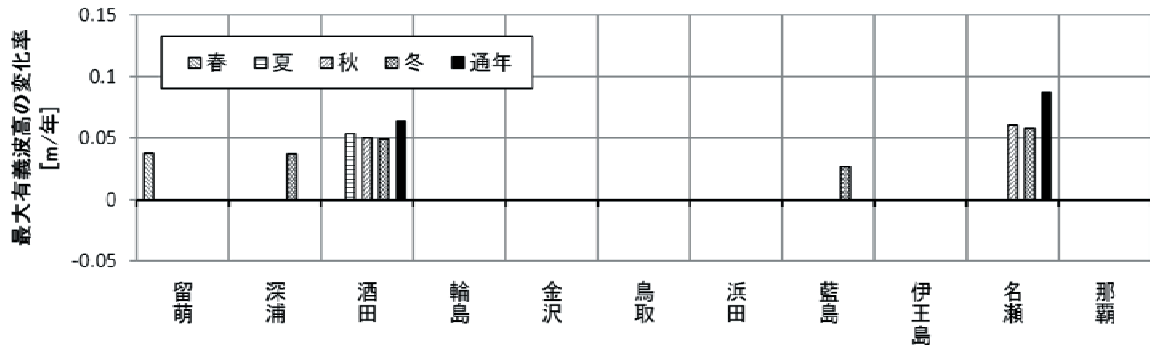


(a) 日本海側

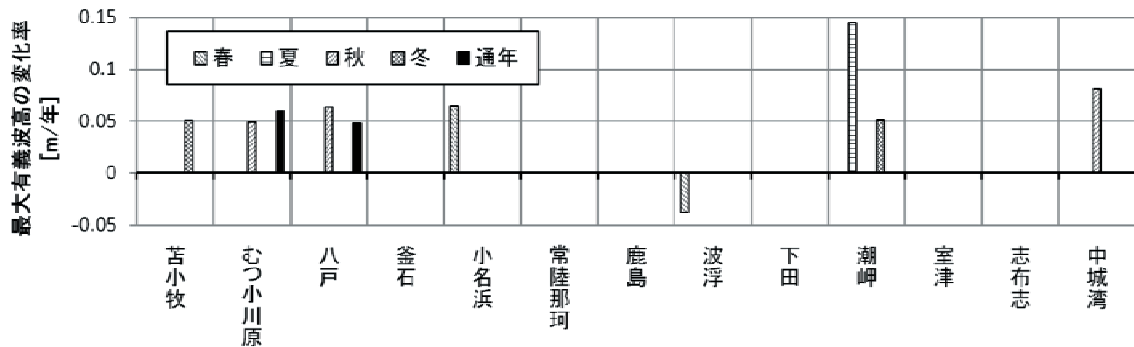


(b) 太平洋側

図-4.1 解析期間全体の最大有義波高の平均値



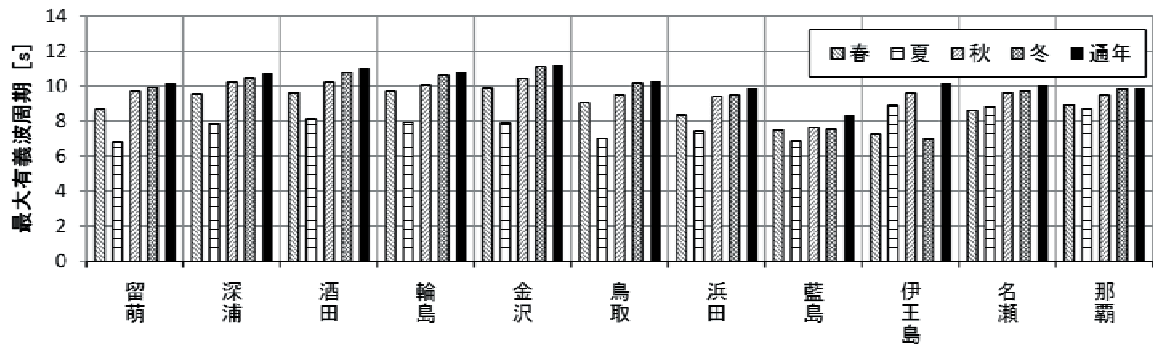
(a) 日本海側



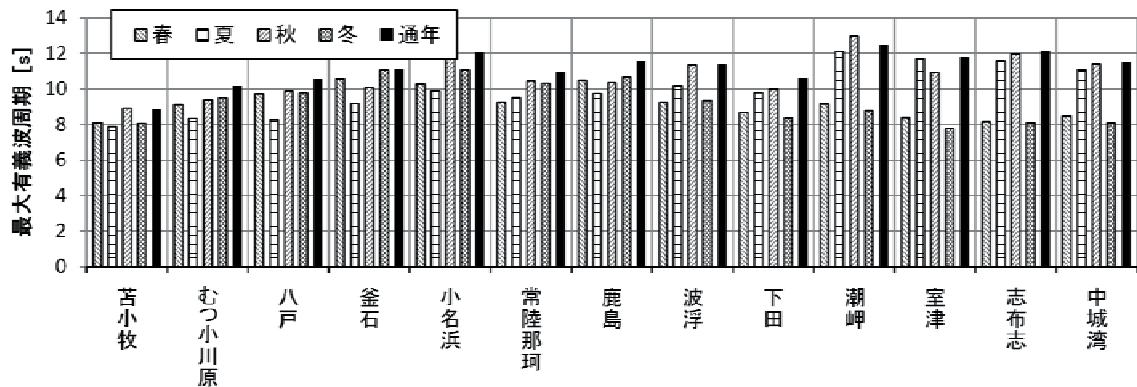
(b) 太平洋側

図-4.2 最大有義波高の経年変化が有意と判断された地点とその変化率



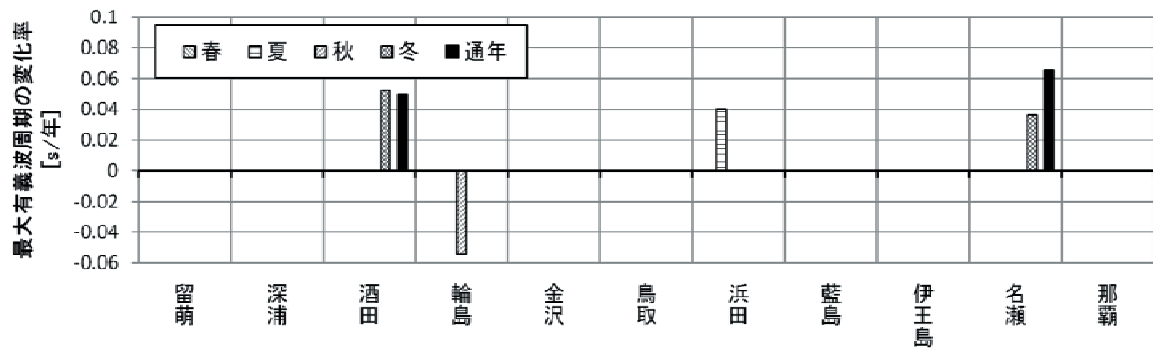


(a) 日本海側

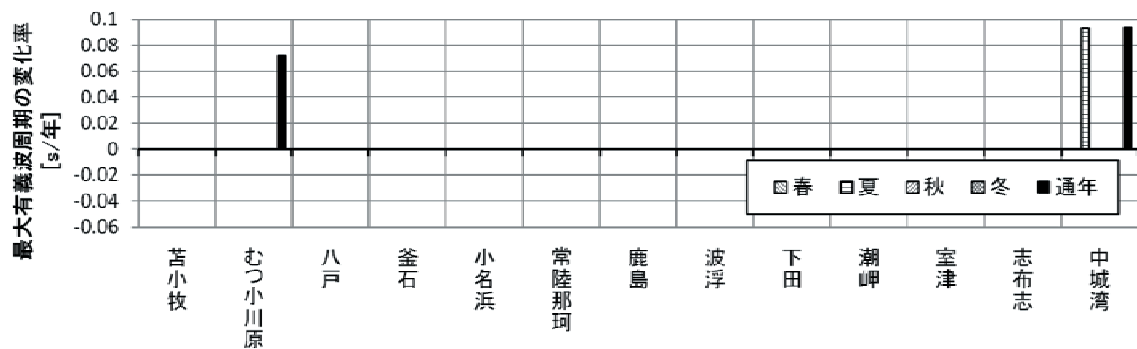


(b) 太平洋側

図-4.3 解析期間全体の最大有義波周期の平均値

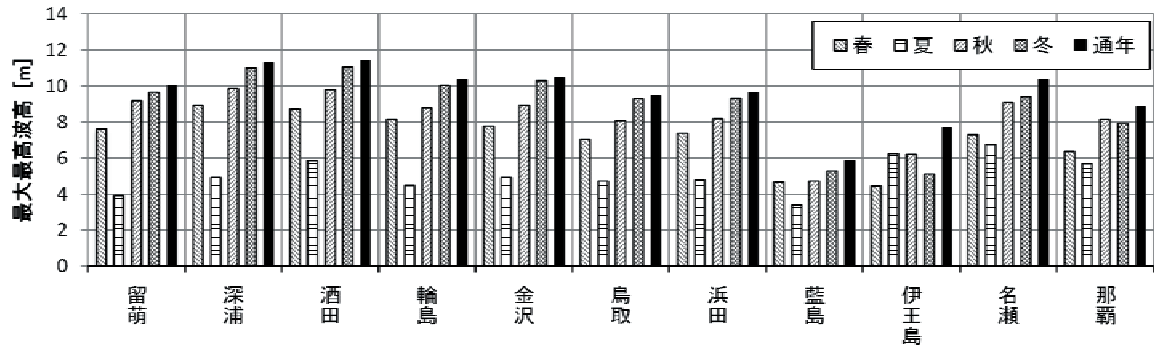


(a) 日本海側

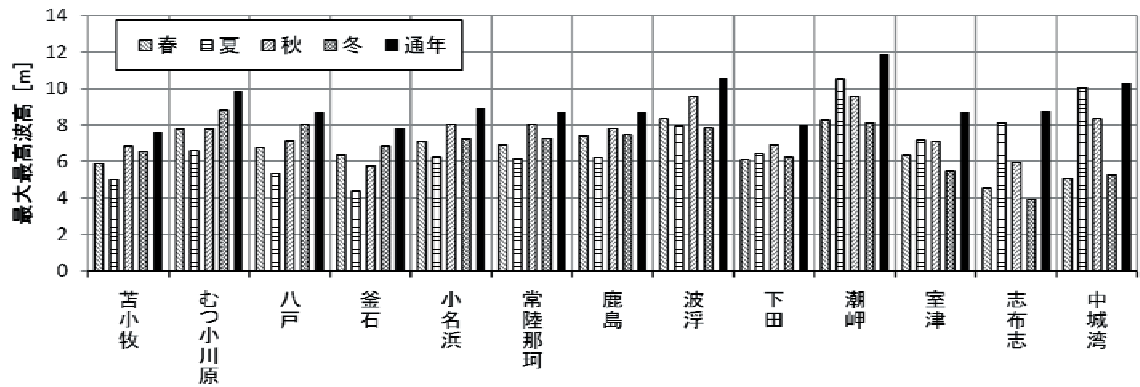


(b) 太平洋側

図-4.4 最大有義波周期の経年変化が有意と判断された地点とその変化率

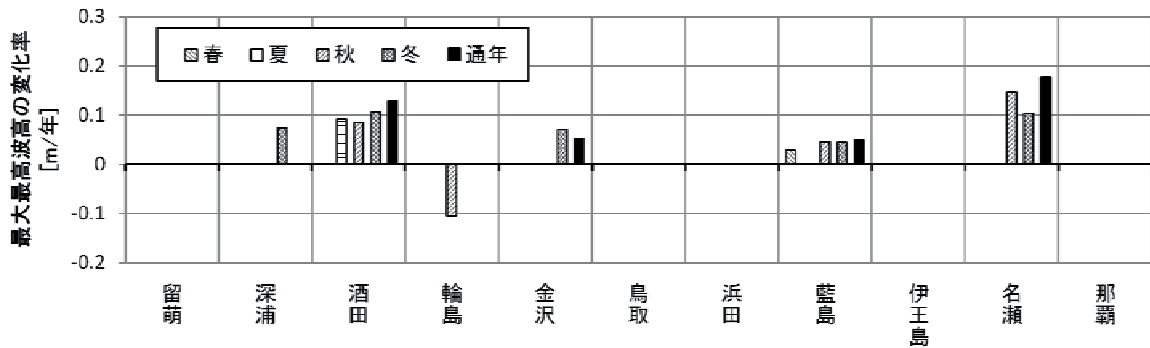


(a) 日本海側

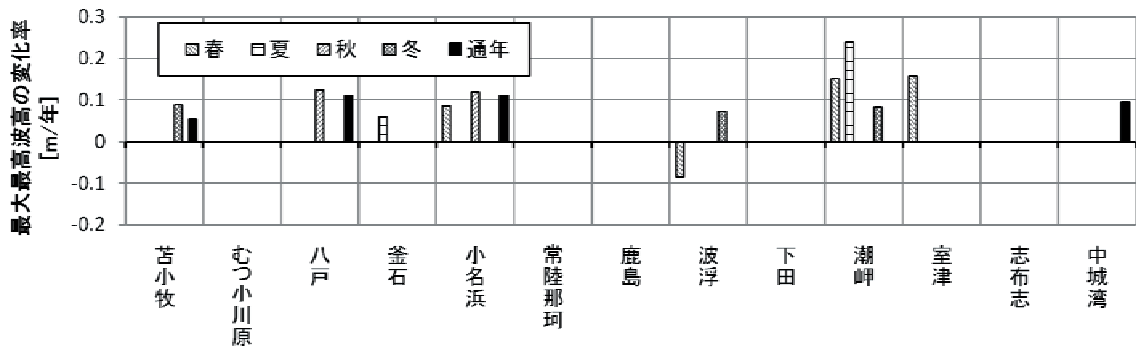


(b) 太平洋側

図-4.5 解析期間全体の最大最高波高の平均値

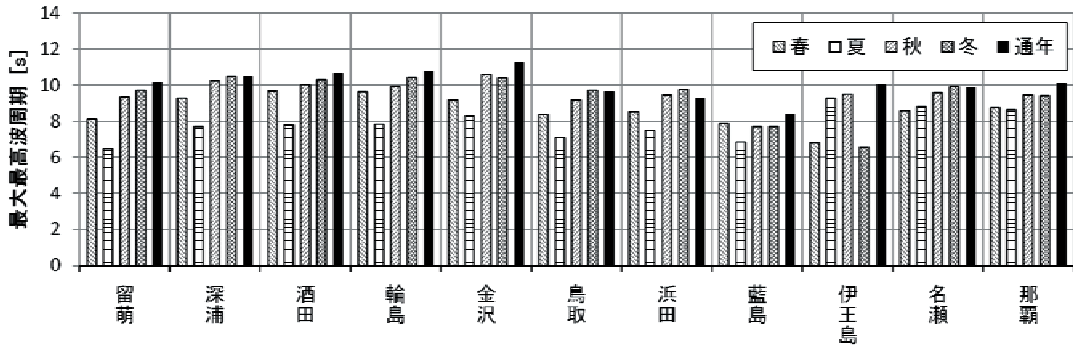


(a) 日本海側

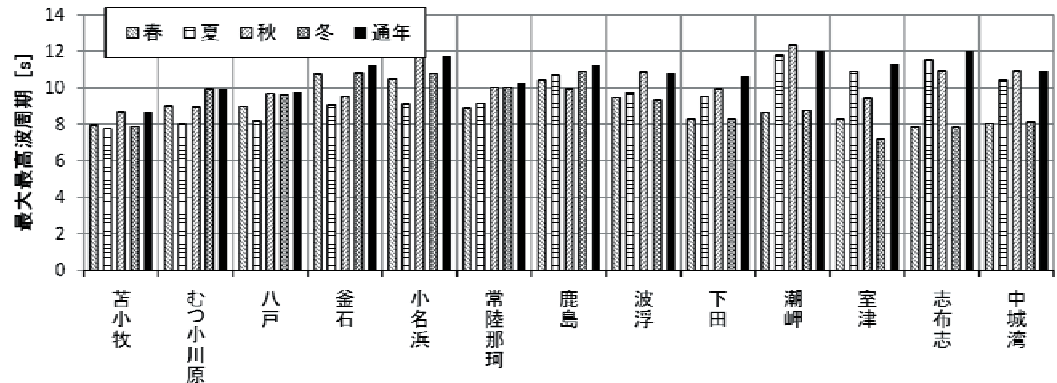


(b) 太平洋側

図-4.6 最大最高波高の経年変化が有意と判断された地点とその変化率

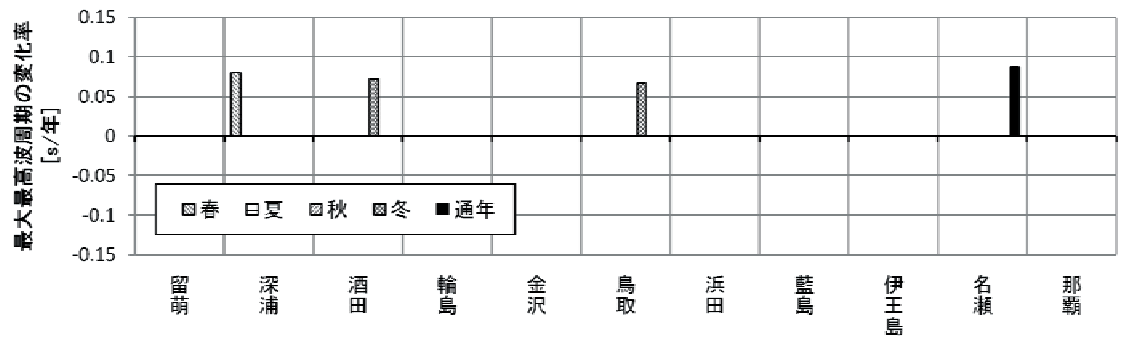


(a) 日本海側

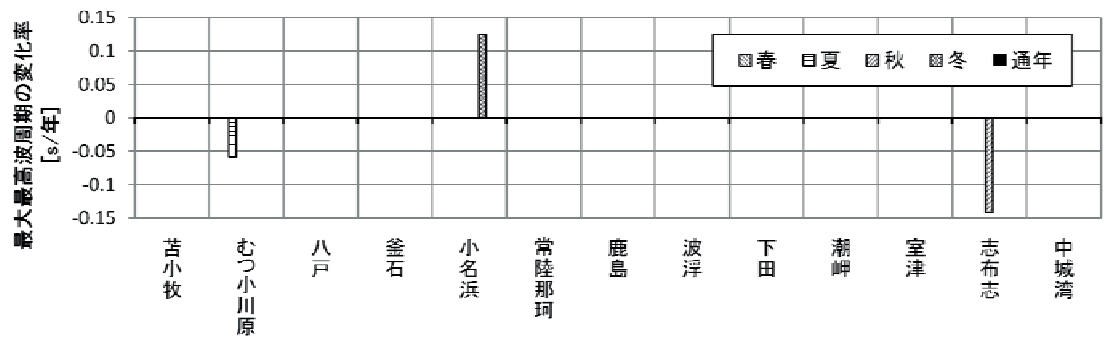


(b) 太平洋側

図-4.7 解析期間全体の最大最高波周期の平均値



(a) 日本海側



(b) 太平洋側

図-4.8 最大最高波周期の経年変化が有意と判断された地点とその変化率

## 5. 平均有義波と気候変動指標の相関

波浪は風によって発生するため、気候と波候には元来強い相関性がある。間瀬ら（2009）は、日本海沿岸の観測地点における年最大有義波高と気候変動指標（北太平洋振動指数、多変数エルニーニョ・南方振動指数、北極振動指数）との相関解析を行い、北極振動指数と相関性が高いと指摘している。ただし、年最大有義波高は統計的に不安定である。

そこで本章では、平均有義波といくつかの気候変動指標の相関解析を行う。

### 5.1 検討すると気候変動指標と解析対象地点

本章では気候変動の指標として、海水温、南方振動指数（SO 指数）、北極振動指数（AO 指数）、太平洋十年規模振動指数（PDO）、北太平洋指数（NPI）を取り上げる。これらの気候変動指標は気象庁および NOAA のホームページに掲載されている。解析対象地点は 11 地点（日本海側：留萌、酒田、輪島、藍島、名瀬；太平洋側：苫小牧、八戸、鹿島、波浮、潮岬、中城湾）である。

#### (1) 海水温

海水温のデータは日本沿岸を 13 海域に区分して算出されており、本検討では解析対象地点が含まれる海域のデータと相関解析を行っている。データは季節別および年平均値として気象庁のホームページに公開されており、それらのデータを用いて、平均有義波高・周期の季節別平均値および年平均値と相関解析を行っている。

#### (2) 南方振動指数（SO 指数）

SO 指数は、エルニーニョ・ラニーニャ現象と関係が深く、正の値の場合はラニーニャ、負の値の場合はエルニーニョを示す。SO 指数は月毎のデータが気象庁のホームページに公開されており、そのデータから季節および年平均値を計算し、平均有義波高・周期と相関解析を

行っている。

#### (3) 北極振動指数（AO 指数）

AO 指数は北極域での気圧配置に関する指標であり、正の値の場合は北極域で気圧が低く、日本を含む中緯度付近で気圧が高いことを示す。負の場合は逆に、日本を含む中緯度付近で気圧が低いことを示す。AO 指数は月毎のデータが NOAA のホームページに公開されており、そのデータから季節および年平均値を計算し、平均有義波高・周期と相関解析を行っている。

#### (4) 太平洋十年規模振動指数（PDO 指数）

PDO 指数は日本付近の冬季の気候に関係する指標であり、PDO 指数が正の値の場合は北太平洋で海水温が低くなり、アリューシャン低気圧および偏西風が平年より強く、寒冬の傾向を示している。逆に負の場合は暖冬を示している。PDO 指数は年毎に冬季のデータが気象庁のホームページに公開されており、そのデータと平均有義波高・周期の冬季のデータを相関解析している。

#### (5) 北太平洋指数（NPI）

NPI は PDO 指数と逆の関係にある指標であり、NPI が正の値の場合は北太平洋で海水温が高くなり、アリューシャン低気圧および偏西風が平年より弱く、暖冬の傾向を示すことを現わしている。負の値は寒冬を示す。NPI も PDO 指数と同様に年毎に冬季のデータが気象庁のホームページに公開されており、そのデータと平均有義波高・周期の冬季のデータを相関解析している。

## 5.2 平均有義波高と気候変動指標の相関性

表-5.1 は平均有義波高と各気候変動指標の相関係数を示す。

平均有義波高と海水温との関係では、秋季および冬季に着目すると日本海側では負の相関を示す。これは冬季に強い低気圧が来襲した際に、海水温の低下と高波浪が

表-5.1 平均有義波高と各気候変動指標の相関係数

	水温海域	海水温					SO指数					AO指数					PDO	NPI
		春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年		
留萌	日本海北東部	0.16	-0.15	-0.40	-0.07	-0.12	-0.45	0.11	0.04	0.03	-0.01	-0.08	-0.14	-0.21	-0.35	-0.36	0.34	-0.09
酒田	日本海中部	-0.23	-0.12	-0.49	-0.14	0.02	0.01	-0.15	0.07	-0.16	-0.28	-0.14	0.08	-0.56	-0.05	-0.04	0.19	-0.27
輪島	日本海南部	-0.48	0.18	-0.28	-0.53	-0.53	0.19	0.08	0.26	-0.19	-0.12	-0.30	-0.17	-0.22	-0.40	-0.52	0.18	-0.09
藍島	東シナ海北部	0.18	-0.01	-0.39	-0.25	0.17	0.01	-0.04	-0.06	-0.09	-0.18	-0.30	-0.05	-0.25	-0.20	-0.08	0.23	-0.27
名瀬	東シナ海南部	-0.27	-0.11	-0.35	-0.40	0.06	0.52	-0.29	-0.28	-0.03	-0.01	-0.38	-0.19	-0.09	-0.26	0.07	0.47	-0.34
苫小牧	釧路沖	0.20	-0.17	0.18	0.20	0.09	0.29	-0.28	-0.25	-0.04	-0.17	0.12	0.01	-0.25	-0.02	0.47	-0.16	0.20
八戸	三陸沖	-0.05	-0.48	0.16	0.13	-0.08	0.31	-0.20	-0.00	-0.05	-0.10	0.15	-0.04	0.33	0.26	0.32	0.06	0.21
鹿島	関東の東	0.24	-0.23	0.34	-0.05	0.09	0.27	0.06	0.11	-0.30	0.18	-0.03	0.16	0.20	-0.01	-0.12	0.31	-0.05
波浮	関東の南	-0.27	-0.44	-0.22	0.37	-0.44	0.48	-0.45	-0.19	-0.01	-0.10	0.14	-0.59	-0.10	0.12	-0.00	0.22	0.12
潮岬	四国・東海北部	0.61	-0.14	0.21	0.36	0.29	0.43	-0.38	-0.66	0.36	-0.23	0.04	-0.11	-0.02	0.08	0.05	-0.09	0.15
中城湾	先島諸島周辺	0.30	0.10	0.90	0.50	0.40	0.30	-0.44	-0.25	0.13	-0.27	-0.18	0.08	-0.01	0.19	-0.08	-0.05	0.23

表-5.2 平均有義波周期と各気候変動指標の相関係数

	水温海域	海水温					SO指数					AO指数					PDO		NPI	
		春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	冬	冬		
留萌	日本海北東部	0.01	0.02	-0.08	0.30	0.29	-0.37	-0.16	-0.39	0.07	-0.33	0.09	-0.13	-0.14	-0.10	0.20	-0.04	0.34		
酒田	日本海中部	0.08	0.25	0.14	0.04	0.50	0.04	0.12	0.26	-0.08	0.04	0.08	0.03	-0.38	-0.03	0.02	0.05	-0.15		
輪島	日本海南部	-0.34	0.29	-0.12	-0.51	-0.08	0.32	0.27	0.12	0.04	0.07	0.03	0.23	-0.13	-0.41	0.12	0.20	-0.02		
藍島	東シナ海北部	0.06	0.00	0.16	0.12	0.41	0.26	0.19	0.10	0.16	0.11	0.11	0.02	0.08	-0.09	0.23	-0.11	0.19		
名瀬	東シナ海南部	-0.04	-0.34	0.12	0.16	0.16	0.36	-0.61	-0.43	-0.29	-0.28	0.10	0.06	0.15	0.00	0.40	0.39	-0.27		
苫小牧	釧路沖	0.09	0.16	0.29	0.18	0.16	0.20	-0.27	-0.40	-0.08	-0.26	0.49	0.22	-0.02	0.55	0.66	-0.37	0.41		
八戸	三陸沖	-0.01	-0.01	0.38	0.02	0.16	0.37	-0.31	-0.05	0.26	0.05	0.26	-0.01	0.38	0.17	0.51	-0.11	0.30		
鹿島	関東の東	-0.17	-0.02	0.26	0.02	0.01	0.37	-0.32	-0.10	0.07	-0.11	0.17	0.32	-0.05	0.17	0.23	-0.14	0.04		
波浮	関東の南	-0.11	0.07	0.11	0.27	0.20	0.43	-0.43	-0.24	0.22	-0.11	-0.02	0.21	0.17	0.32	0.40	-0.18	0.36		
潮岬	四国・東海北部	0.24	0.09	-0.02	0.28	0.05	0.12	-0.34	-0.73	-0.05	-0.27	0.13	0.48	0.13	0.67	0.50	-0.18	0.30		
中城湾	先島諸島周辺	-0.35	-0.41	-0.05	0.42	-0.06	0.32	-0.52	-0.49	-0.06	-0.40	0.42	0.18	-0.06	0.38	0.36	-0.20	0.29		

表-6.1 各波浪統計量の経年変化傾向

地点名	平均有義波高の変化率					平均有義波周期の変化率					静穏率の変化率					波パワーの変化率					最大有義波高の変化率					最大有義波周期の変化率					
	春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	春	夏	秋	冬	通年	
留萌																															
深浦	▲																														
酒田																															
輪島																															
金沢		▲																													
鳥取																															
浜田																															
藍島	▲	▲	▲		▲		▲	▲	▲	▲	▼		▲	▲		▲				▲											
伊王島	▲											▲																			
名瀬							▲		▲	▲	▲					▲	▲			▲	▲	▲							▲	▲	
那覇							▲	▲																							
苫小牧							▲	▲	▲	▲																					
むつ小川原					▲										▼																▲
八戸	▲																														
釜石																															
仙台新港																															
小名浜																															
常陸那珂																															
鹿島																															
波浮	▼																														
下田																															
潮岬																															
室津																															
志布志																															
中城湾	▲	▲	▲	▲																											

発生することに対応していると考えられる。太平洋側の秋季および冬季では、波浮の秋季、鹿島の冬季を除き正の相関を示す。

平均有義波高とSO指数との関係は、春季を除くと全体的に相関性は弱いものの、負の相関（エルニーニョ時に高波浪）を示している。

AO指数と平均有義波高の相関解析結果も多くの場合に負の相関を示している。これはAO指数が負の場合、日本を含む中緯度付近の気圧が低く、高波が起りやすいことに対応している。PDOおよびNPIによる相関係数は、日本海側ではPDOとは正の相関、NPIとは負の相関を示し、寒冬の場合に波高が大きいという関係が現れている。

5.3 平均有義波周期と気候変動指標の相関性

表-5.2 は表-5.1 と同様に平均有義波周期と各気候変動指標の相関係数を示す。波高ほどの相関性は得られていないが、SO指数との関係は、波高と同様に春季のデ

ータではほとんどの地点で正の相関、それ以外の期間では負の相関の地点が多い。AO指数とは、比較的相関を示す地点が多く、通年ではすべての地点で正の相関を示している。PDOおよびNPIでは、太平洋側でPDOとは負の相関、NPIとは正の相関を示し、暖冬の場合に周期が増加する傾向を示す。

6. まとめ

本研究では、NOWPHASの波浪観測データに基づいて季節別の波浪統計量の経年変化を検討するとともに、気候変動指標との相関性についても検討した。

表-6.1は、平均有義波高・周期、静穏率、波パワーおよび最大有義波高・周期の経年変化について、棄却検定により有意な増加と判断されたものを▲、減少と判断されたものを▼と記したものである。この表から以下のことを読み取ることができる。

- ①平均有義波高については、通年値で藍島、むつ小川原、

常陸那珂，中城湾において増加傾向，波浮では減少傾向を示している．藍島，中城湾では3つの季節において増加傾向を示している．特定の季節のみ変化傾向を示す地点は，日本海側の深浦，金沢，伊王島で，春季もしくは夏季のみ増加傾向を，太平洋側では八戸で春季，潮岬で冬季のみ増加傾向を示している．

- ②平均有義波周期では，下田における春季のデータを除き変化が有意と認められたものは全て増加傾向を示している．地域別に見ると，日本海北部の深浦，酒田，金沢では春季，夏季で増加傾向にある．東シナ海に面した藍島，名瀬では3つの季節で増加傾向にある．太平洋側では特に苫小牧から常陸那珂の北部沿岸において増加傾向がある．すなわち台風よりも温帯低気圧の影響が大きな地方で増加傾向を示している．
- ③静穏率については平均有義波高と逆の傾向になっている．
- ④波パワーは有意な変化のある地点のほとんどで増加傾向を示している．通年で増加傾向を示しているのは，藍島，名瀬，苫小牧，小名浜，常陸那珂，潮岬，中城湾の7地点であり，日本海側，太平洋側ともに南方の地域を中心に増加傾向を示す地点がある．
- ⑤最大有義波高の通年値で増加傾向を示す地点は酒田，名瀬，むつ小川原，八戸である．季節別に見ると，日本海側では冬季に，東北太平洋沿岸では秋季にそれぞれ増加傾向を示す地点がある．
- ⑥最大有義波周期は最大有義波高ほど有意な変化を示す地点が多くない．

また，本論文で検討した気候変動指標（海水温，SO指数，AO指数，PDO指数，NPI）の中で平均有義波高・周期と最も相関が高いのは海水温であった．

今後の課題としては，海域に区分した解析，波浪推算結果との比較が挙げられる．また，今回は経年変化傾向の分析に直線回帰を行ったが，10年程度の周期的な変動に関する検討も必要である．

## 7. おわりに

本資料は NOWPHAS の波浪観測の開始から現在までの波浪統計量の経年変化の傾向を述べるとともに，波浪データを使用する際の注意点もまとめたものである．今後の港湾計画，構造物の設計・維持補修等の実務的業務，また，広く波浪や気候変動に関する研究等の基礎資料となれば幸いである．

(2011年8月12日受付)

## 謝辞

本研究で用いた各年の NOWPHAS の波浪観測資料は，国土交通省港湾局および関係各機関の相互協力のもとに，作成されたものである．関係者各位の御尽力に対して，心より敬意を表する．

## 参考文献

- 沿岸開発技術研究センター（2000）：沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書，181p.
- 河合弘泰・佐藤 真・川口浩二・関 克己（2011）：全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS2009），港湾空港技術研究所資料，No.1226，120p.
- 気象庁ホームページ：海洋の健康診断表，  
<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/index.html>
- 清水勝義・永井紀彦・里見 茂・李 在炯・富田雄一郎・久高将信・額田恭史（2006）：長期波浪観測値と気象データに基づく波候の変動解析，海岸工学論文集，第53巻，pp.131-135.
- 菅原一晃・小舟浩治・佐々木 弘・橋本典明・亀山 豊・成田 明（1986）：沿岸波浪観測15か年統計（昭和45年～昭和59年），港湾技研資料，No.554，872p.
- 高橋重雄・安達 崇（1989）：日本周辺における波パワーの特性と波力発電，港湾技研資料，No.654，18p.
- 高橋智晴・副島 毅・佐々木徹也（1975）：波浪に関する拠点観測3か年統計（昭和45年～47年），港湾技研資料，No.208，58p.
- 高橋智晴・金子大二郎・佐々木徹也・広瀬宗一・佐々木弘・副島 毅（1976）：波浪に関する拠点観測五か年統計（昭和45年～49年），港湾技研資料，No.234，304p.
- 高橋智晴・広瀬宗一・菅原一晃・橋本典明（1981）：波浪に関する拠点観測10か年統計（昭和45年～昭和54年），港湾技研資料，No.401，711p.
- 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正（1993）：全国港湾海洋波浪観測20か年統計（NOWPHAS1970～1989），港湾技研資料，No.744，247p.
- 永井紀彦・渡邊 弘・川口浩二（1998）：長期波浪観測結果に基づく我が国沿岸の波パワー出現特性の検討，港湾技研資料，No.895，26p.
- 永井紀彦（2002）：全国港湾海洋波浪観測30か年統計（NOWPHAS1970-1999），港湾空港技術研究所資料，No.1035，388p.
- 橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・朴 慶寿（1993）：波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算方法について，港湾技術研究所報告，第32巻，第1号，pp.27-51.

畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一・李 敏杰  
(2002) : わが国沿岸での長期波浪推算資料に基づく  
波高の傾向変動の解析, 海岸工学論文集, 第49巻,  
pp.1346-1350.

平石哲也・平山克也・鹿島寛章・春尾和人・宮里一郎  
(2008) : 偶発波浪荷重による被害例とその特性, 海  
岸工学論文集, 第55巻, pp.981-985.

間瀬 肇・田中 遼・森 信人・安田誠宏 (2009) : 日本  
海沿岸における波浪の経年変化特性に関する研究,  
土木学会論文集B2, Vol.B-2-65, No.1, pp.1251-1255.

IPCC (2001) : IPCC Third Assessment Report: Climate Change  
2001, 以下のサイトからダウンロード可能  
[http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/)

NOAA ホーム ページ : Climate Prediction Center ,  
[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao\\_index.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index.html)



付録 最高波高に対するデータ長の影響

通常 100 波分のデータ長は 20 分間より短い。最高波を 100 波から求めると、その中に 20 分間では最高波となる個々波が含まれない可能性がある。このような理由により最高波の値はデータ長の影響を受ける。

統計に用いる波の数を  $N_0$  とした場合、波高の出現確率密度関数にレイリー分布を仮定し最高波高 (の比  $x_{max}$ ) の出現確率  $p'$  を求めると以下の式で表される。

$$p'(x_{max})dx = N_0 [1 - P(x_{max})]^{N_0-1} p(x_{max})dx \quad (1)$$

ここで  $P(x)$ : 波高の超過確率,  $p(x)$ : 波高の出現確率密度関数である。また、レイリー分布は以下の式である。

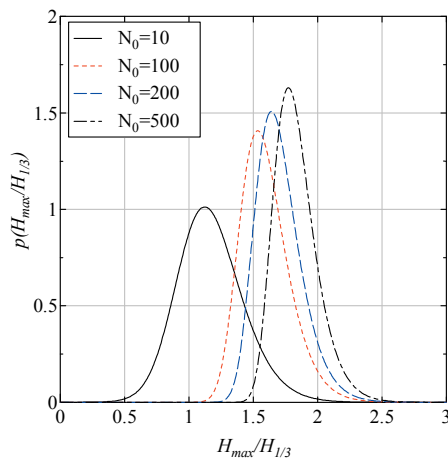
$$p(x)dx = 2a^2 x \exp(-a^2 x^2) dx \quad (2)$$

ここで、 $x$ : 波高比であり、 $a$  は無次元化に用いる波高を平均波高とした場合、以下の定数となる。

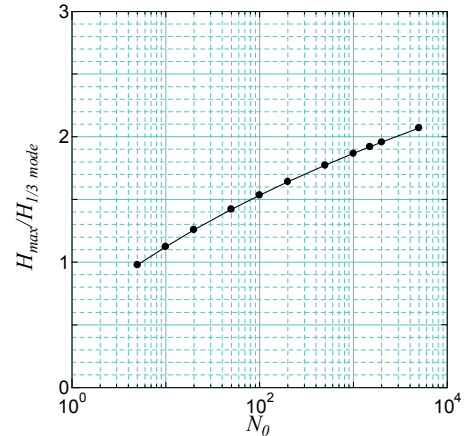
$$a = \sqrt{\pi} / 2 \quad (3)$$

付図-1 に有義波高で無次元化した場合の、最高波高の出現確率分布を示す。波の数 (標本数) により大きく影響を受けている。また、付図-2 には、波の数を変えた場合の波高比の最頻値について示す。この図から分かるように、波の数の増加に伴い波高比も増大する。

付表-1 に波の数毎に最高波高の確率分布の統計量 (平均値, 標準偏差, 最頻値) をまとめた。20 分間のデータには 200 波 (平均周期 6 秒) 程度が含まれるが、100 波統計値と平均値と比較すると 1.07 倍程度大きい最高波高 (逆数で 0.94 倍) になると予想される。



付図-1 波の数を変えた場合の最高波高の出現確率分布



付図-2 波の数を変えた場合の波高比の最頻値の変化

付表-1 最高波高の出現確率分布の統計量に及ぼす波の数の影響

波の数 $N_0$	平均値 mean	標準偏差 std.	最頻値 mode
5	1.650	0.431	1.560
10	1.891	0.392	1.792
20	2.110	0.360	2.008
50	2.371	0.326	2.269
100	2.552	0.305	2.451
150	2.652	0.294	2.552
200	2.721	0.287	2.621
300	2.815	0.278	2.716
500	2.929	0.268	2.832
1000	3.077	0.256	2.982
2000	3.218	0.245	3.125
5000	3.395	0.233	3.305



港湾空港技術研究所資料 No.1241

2011. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています