

# 港湾技研資料

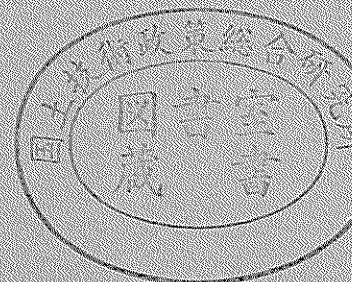
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 654      June 1989

日本周辺における  
波パワーの特性と波力発電

高   橋   重   雄  
安   達            崇

運輸省港湾技術研究所



# Wave Power around Japan from a Viewpoint of Its Utilization

Shigeo TAKAHASHI \*

Takashi ADACHI \*\*

## Synopsis

The estimation of the incident wave power is essential in the design of any system of wave energy utilization. The Bureau of Ports and Harbors of the Ministry of Transport and other organizations in Japan are conducting wave observations throughout the nation. In this note, the quantity of the wave power around Japanese islands is briefly described based on the observed data. The quality of the wave power, that is its variation, is also discussed. The variation of the wave power discussed in the note is not due to the irregularity of the waves but due to changing weather, which is called "wave climate".

The average of the total amount of the wave power around Japanese islands is 36 million kW. If Japan is surrounded by a solid line with its length of 5200 km, the average wave power is about 7 kW/m along the solid line. The wave power is large in the middle and northern part of the Honshu Island along the Pacific Ocean coast and along the Japan Sea coast. The variation of wave power is very intensive. Especially wave power in the Japan Sea side have very clear seasonal change.

This variation hinders the utilization of wave power. There is no index to describe properly the influence of the variation on the wave power conversion. In the note, simulations of a wave energy converter are conducted to calculate its output based on the observed wave data, and the influence is discussed. It is found that the simulation is a very useful means and the working rate of the converter and the minimum storage capacity of the converted energy, the time rate of operation and the time rate of operation with the rate power are very practical indices concerning the fluctuation of the output power of the converter.

The development of inexpensive large-capacity storage apparatuses will solve the problems related to the fluctuation of the wave climate. However, alternatives not using such a storage apparatus should also be considered to promote the utilization of wave power.

**Key Words:** Wave Energy, Wave Power, Wave Observation, Wave Power Converter, Wave Energy Utilization

---

\* Chief of the Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engg. Div.

\*\* Member of the Ocean Energy Utilization Laboratory, Hydraulic Engg. Div.

# 日本周辺における波パワーの特性と波力発電

高橋重雄\*  
安達崇\*\*

## 要 旨

波エネルギー変換装置を用いて波エネルギーを利用するとき、波エネルギーの平均量とその変動性を把握しておく必要がある。ここでは、波浪観測データに基づいて日本周辺の平均的な波エネルギーの量とその変動特性を検討した。ただし、正しくいえば波エネルギーではなく波エネルギーの輸送率、すなわち波パワーについて検討している。

日本周辺の波パワーの総平均量は3600万kWで、これを日本を囲む仮想の折れ線の長さ5200kmで除すと、約7kW/mとなる。波パワーは太平洋岸の関東以北や日本海側の北陸・東北沿岸で大きい。波パワーの変動性は著しく、季節的変動のみならず日々の変動も大きい。特に日本海側での季節的な変動が顕著である。

波エネルギーの利用にとってこうした変動性は大きな障害となる。波エネルギー変換装置の側からこの変動性を定量的に表す一般的な指標はない。ここでは、波力発電装置を対象に、波浪観測データに基づく発電シミュレーションを行い、変動性の影響を検討した。変動性が波力発電に及ぼす影響は、シミュレーションから得られる発電機稼働率、最小必要蓄電容量、運転時間率、定格運転時間率等の実用的なパラメータによって把握できることがわかった。

波エネルギーの利用を促進するためには、変動性を問題としないような用途に用いるなど種々の考慮が必要である。

キーワード：波エネルギー、波パワー、波浪観測、波力発電、波エネルギー利用

## 1. まえがき

海の波のエネルギーを利用しようとする試みは古くからある。また、1973年の第一次石油危機以降は、多くの機関で本格的な研究が行われている。港湾技術研究所においても、水柱振動式で空気タービン方式の波エネルギー変換装置を有する、波力発電ケーソンの開発<sup>1)</sup>を1982年から始め、1987年からはその現地実証実験を運輸省第一港湾建設局が酒田港で実施している<sup>2)</sup>。

入射する波のエネルギーを知ることは、波エネルギー変換装置の設計において不可欠である。我が国においては、運輸省港湾局・港湾建設局や他の機関で波浪観測が行われている。本資料では、波エネルギーの利用に供するため、観測データに基づいて日本周辺の波エネルギーの量について検討する。また波エネルギーの質、すなわち波エネルギーの変動性についても検討している。ただ

し、波エネルギーの変動性には二つの面がある。すなわち、

- ①波の不規則性による変動
- ②気象変化に伴う変動

前者については別に検討しているので<sup>1)</sup>、ここでは後者について検討する。後者は通常有義波高や周期の変化として表され、波候 (Wave Climate) と呼ばれている。この変動性は、波エネルギー変換装置による波エネルギーの利用に対して最も大きな障害となる。したがって、変動性と波エネルギー変換装置の設計との関係についても検討を加えている。

なお、日本周辺の波や波エネルギーに関しては、すでに田端ら<sup>3)</sup>、合田<sup>4)</sup>、広瀬ら<sup>5)</sup>等によって検討が行われており、ここではそれらの結果も含めて述べることとする。

\* 水工部 耐波研究室長

\*\* 水工部 海洋エネルギー利用研究室

## 2. 波と波パワー

### 2.1 波の諸元と波パワー

単位時間に波エネルギー変換装置に入射する波エネルギーは波エネルギーの輸送率 (Wave Energy Flux) で表される。波エネルギーの輸送率は波パワー (Wave Power) ともいい、本資料では波エネルギーとの区別を明確にするために、波パワーという言葉を用いる。波高  $H$ 、周期  $T$  の規則的な波の波パワー  $\bar{W}_1$  は、次式で表せる。

$$\bar{W}_1 = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 C_g \quad (1)$$

ここに、 $\rho_w$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $C_g$  は波の群速度である。波パワーは、電線中を送られてくる電気の波パワーと同じくワット (W, Nm/s) の単位を持つ。ただし、上式の波パワーは波峯線 1 m 当りの波パワーであり、W/m の単位を持つ。この波が、入射角  $\theta_M$  で波エネルギー変換装置に入射するとき、波エネルギー変換装置の単位長さ当りの入射パワーは、式(1)の値に  $\cos \theta_M$  を乗じた値となる。

実際の海の波は、規則的な波ではなくて不規則であり、しかも方向分散性を持つ波である。この波が、中心の入射角  $\theta_M$  で波エネルギー変換装置に入射するとき、その入射波パワーは、

$$\bar{W}_1 = \rho_w g \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_0^{\infty} S(f; \theta) C_g(f) \cos(\theta + \theta_M) df d\theta \quad (2)$$

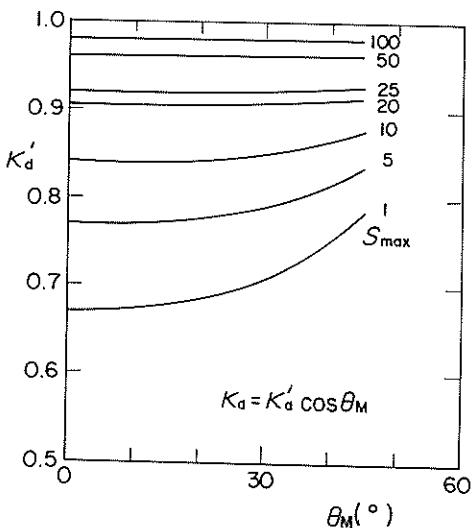


図-1(a)  $s_{\max}$  と  $\theta_M$  に対する  $\kappa'_d$  の変化

となる。上式は、不規則波が多くの周波数成分と方向成分の規則波の、線形的な重ね合わせで表せるとして求められたものであり、 $f$  と  $\theta$  は、各成分波の周波数と波向きである。 $S(f; \theta)$  は方向スペクトル、 $C_g(f)$  は群速度である。また、 $\theta_M + \theta_{\max} = \frac{\pi}{2}$ 、 $\theta_M + \theta_{\min} = -\frac{\pi}{2}$  である。ただし、 $|\theta_{\max}| \leq \frac{\pi}{2}$ 、 $|\theta_{\min}| \leq \frac{\pi}{2}$  である。

一般に、方向スペクトルを持つ波のパワーは、その有義波高  $H_{1/3}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  によっても表すことができる。すなわち、

$$\bar{W}_1 = K_d K_w H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (3)$$

ここに、 $\kappa_d$  は中心波向き  $\theta_M$  と方向分散性による波パワーの変化、 $\kappa_w$  は水深による波パワーの変化を示す係数である。これらの係数は、方向スペクトルと水深が与えられたならば、式(2)と(3)によって計算することができる。すなわち、式(3)で  $\kappa_d = 1$  とおき式(2)で  $\theta + \theta_M = 0$  として、まず  $\kappa_w$  を求め、再び式(2)と式(3)より  $\kappa_d$  を求める。ただし、 $H_{1/3}$  は m、 $T_{1/3}$  は s、 $\bar{W}_1$  は kW/m の単位で表している。

### 2.2 標準スペクトルと波パワー

方向スペクトル  $S(f; \theta)$  は、一般に周波数スペクトル  $S(f)$  と方向関数  $G(f; \theta)$  に分けられる。周波数スペクトル  $S(f)$  として標準的なもの Bretschneider-Mitsuyasu 型のものがあり、また方向関数  $G(f; \theta)$  として Mitsuyasu 型のものがある。Mitsuyasu 型の方向関数では、方向集中度パラメータ  $s_{\max}$  が重要であり、これが小さいほど方向分散性の大きい波を表す。一般に  $s_{\max}$  は、風波で 10、減衰距離の短い

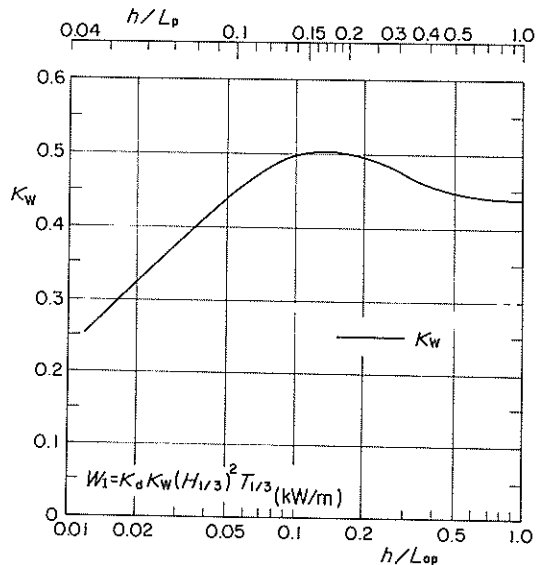


図-1(b)  $h/L_{op}$  に対する  $\kappa_w$  の変化

うねりで25、減衰距離の長いうねりで75程度と考えられている<sup>6)</sup>。

図-1(a)と(b)は、この標準的な方向スペクトルの場合の $\kappa_d$ と $\kappa_w$ の値を示すものである。ただし、(a)では $\kappa_d$ を $\kappa_d = \kappa_d / \cos \theta_M$ として $\kappa_d'$ で示している。 $\kappa_d'$ は、 $\theta_M$ と $s_{max}$ の関数として表されるが、 $s_{max}$ がある程度以上では、 $\theta_M$ に対してあまり変化しない。たとえば、 $s_{max}$ が25では $\kappa_d = 0.92 \cos \theta_M$ と表せる。また、(b)の $\kappa_w$ は横軸を $h/L_{op}$ にとって示してある。 $h$ は水深であり、 $L_{op}$ は周波数スペク

トルにおけるピーク周波数 $f_p$ の波の深海における波長である。有義波周期とピーク周波数との関係は $T_{1/3} = 1/1.05 f_p$ で与えている。水深の大きい沖合において、方向分散性が非常に小さい波でしかも波エネルギー変換装置への入射角 $\theta_M$ が $0^\circ$ であれば、 $\kappa_w = 0.44$ 、 $\kappa_d = 1.0$ となり、入射波パワーは、 $0.44 H^2_{1/3} T_{1/3}$ となる。一方、たとえば、 $h = 20\text{m}$ 、 $T_{1/3} = 7\text{s}$ 、 $s_{max} = 25$ の場合には、 $\kappa_d' = 0.92$ 、 $\kappa_w = 0.485$ であり、 $0.446 H^2_{1/3} T_{1/3} \cos \theta_M$ となる。なお、 $\bar{W}_1$ と $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ との関係を

表-1 波浪観測結果(運輸省港湾局・港湾建設局)

測定点	有義波高 平均値(m) (標準偏差)	有義波周期 平均値(s) (標準偏差)	$r_B$	波パワーの 平均値 (kW/m)	水深 (m)	備考
Mutsuogawara	1.02 (0.678)	7.44 (2.043)	2.44	6.3	-49	
Hachinohe	0.92 (0.601)	7.06 (2.058)	2.57	5.0	-21	
Miyako	0.53 (0.397)	6.42 (1.881)	2.55	1.7	-23.3	
Kamaishi	0.85 (0.564)	7.50 (1.974)	2.68	4.8	-49	
Sendai	0.79 (0.475)	7.72 (1.934)	2.60	3.8	-20	
Souma	0.95 (0.510)	7.40 (2.100)	2.74	4.9	-16	
Hitachinaka	1.19 (0.587)	7.61 (1.667)	2.78	7.4	-30	
Kashima	1.39 (0.723)	7.97 (1.756)	2.72	10.9	-23.4	
Habu	1.52 (0.666)	7.38 (1.327)	3.07	11.5	-49	
Hamakanaya	0.58 (0.389)	4.97 (1.496)	2.79	1.6	-22	
Gobouoki	1.01 (0.550)	6.50 (1.710)	2.57	4.6	-170	
Koube	0.38 (0.187)	3.50 (0.549)	3.26	0.4	-17	
Kouchioki	0.84 (0.662)	7.90 (1.720)	2.32	5.1	-120	
Aburatsu	1.03 (0.667)	7.50 (1.609)	2.60	6.7	-48.5	
Shibushiwan	0.62 (0.500)	6.72 (1.782)	2.42	2.5	-35	
Nakazusukuwan	1.04 (0.646)	7.28 (1.469)	2.88	7.0	-50	
Naha	0.99 (0.793)	5.97 (2.079)	2.87	6.7	-51	
Naze	1.13 (0.815)	6.26 (1.483)	2.66	7.7	-50	
Ioushima	0.56 (0.490)	4.80 (1.240)	2.66	1.61	-50	
Genkainada	0.86 (0.630)	5.80 (1.370)	2.45	3.8	-45	
Ainoshima	0.59 (0.463)	4.56 (1.308)	2.67	1.3	-20.7	
Hamada	1.15 (0.900)	5.75 (1.857)	2.78	8.3	-51	
Tottori	1.10 (0.868)	5.88 (1.550)	2.52	7.1	-30	
Kanazawa	1.14 (1.206)	5.66 (1.740)	2.81	10.9	-20.2	
Wajima	1.21 (0.995)	5.80 (1.623)	2.76	9.6	-50	
Hajikizaki	1.29 (1.048)	5.22 (1.958)	2.78	9.8	-54	
Niigata-nishi	1.01 (0.900)	5.65 (1.610)	2.66	6.8	-22.7	
Sakata	1.15 (1.071)	5.30 (1.946)	2.81	9.2	-20.4	
Akita	1.32 (1.170)	5.90 (1.530)	2.74	12.5	-700	
Fukaura	1.13 (0.976)	5.40 (1.418)	2.67	8.0	-49.6	
Setana	1.15 (0.987)	5.24 (1.906)	2.70	8.0	-52.9	
Rumoi	0.96 (0.893)	4.60 (2.399)	2.71	5.3	-50	
Monbetsu	0.82 (0.743)	5.22 (3.201)	2.45	3.9	-52	
Kushiro	0.93 (0.566)	7.22 (2.104)	2.50	4.7	-19.5	
Tomakomai	0.72 (0.501)	5.47 (2.377)	2.55	2.5	-50.7	

表 - 2 波浪観測結果 (気象庁ほか)

測定点	有義波高 平均値 (m) (S.D.)	有義波周期 平均値 (s)	$r_s$	波パワーの 平均値 (kW/m)	水深 (m)	備考*
Ejima	1.30 (0.77)	7.9	2.7	12.0	-57	M.A.
Irouzaki	1.14 (0.58)	6.1	2.7	6.1	-50	M.A.
Sakihama	1.04 (0.54)	6.7	2.7	5.6	-48	M.A.
Fukue	1.01 (0.74)	5.5	2.7	6.2	-51	M.A.
Matsumae	0.94 (0.77)	5.1	2.7	5.6	-49	M.A.
Tokyo Bay	0.36 (0.13)	3.2	2.7	0.28	-16.5	D.B.P.C.
Tokyo Port	0.30 (0.16)	2.3	2.7	0.16	-14.0	M.B.P.H.

\* M.A. : Meteorological Agency, D.B.P.C : 2nd District Bureau of Port Construction (Ministry of Transport)  
M.B.P.H. : Bureau of Ports and Harbours of Municipal Government  
The wave power is estimated assuming that  $r_s=2.7$ .

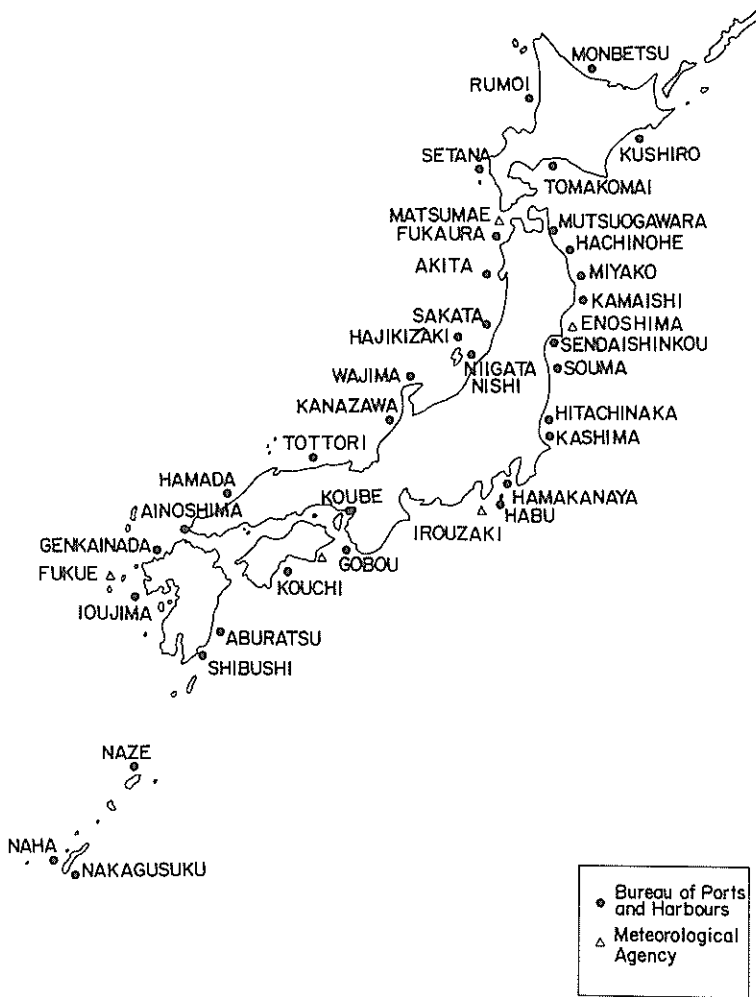


図 - 2 日本における主要な波浪観測地点

$$\bar{W}_1 = 0.5 H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (4)$$

と置くことがある。これは、不規則な波の周期がすべて有義波周期に等しいとして求められたものである。式(4)は、式(3)のほぼ上限を表す。

### 2.3 波の伝播と波パワー

一般に、ある海域を代表する波の諸元は、沖合における観測値や推算値によって与えられる。沖合における波の諸元が求められ、波のパワーが計算できれば、岸側のある場所に設置された波エネルギー変換装置に入射する波のパワーを求めることができる。波長に比して水深が深い場合や、やや浅くても単調な平行等深線の海底地形であれば、沖合での波パワーと同じと考えてよい。しかしながら、海底地形が複雑な場合には、海底地形による屈折や浅水変形を考慮しなければならない。特に浅い海域では、砕波による変形も重要となる。海底地形が与えられれば、砕波による変形を含んで屈折や浅水変形が計算できるが、複雑な数値計算を行う必要がある。ただし、合田は一定勾配の海底上の砕波変形の算定図を提案しており<sup>6)</sup>、これによって得られる有義波高を用いて、砕波による波パワーの変化をある程度推定することができる。すなわち、波パワーの変化(減衰)率 $\beta_b$ は次式となる。

$$\beta_b = (H_{1/3}/H_0)^2 (C_{g0}/C_g) \quad (5)$$

ここに、 $C_{g0}$ は沖合での群速度、 $C_g$ はその水深での群速度、 $H_0$ は沖合での有義波高である。 $H_{1/3}$ はその水深での有義波高であり、合田の算定図より求められる。たとえば、 $T_{1/3} = 7$  s、 $H_0 = 3$  mの波は、水深6.9 m ( $h/H_0 = 2.3$ ) までは波パワーの減衰を無視でき、水深3 mで波パワーが沖合の46%となる。

## 3. 日本周辺の波パワーの平均量

### 3.1 波浪観測結果

運輸省港湾局・港湾建設局では、日本各地の港湾及びその沖合において波浪観測を行っている。そのうちの40地点のデータを港湾技術研究所で集中処理している<sup>7)</sup>。観測は、2時間毎に20分間行われ、20分間の有義波高や周期が求められている。表-1は1970年から1985年までの波浪観測結果の一部である。観測地点はこの期間内に徐々に増えており、観測地点によっては数年のデータしかないものもある。表には、各地点の観測期間の有義波高および有義波周期の平均値と標準偏差が示してある。太平洋側の外海に面したところでは、有義波高の平均値が1~1.5 m程度で有義波周期の平均値が7秒前後であ

る。日本海側では有義波高の平均値が1~1.3 mで有義波周期の平均値は約6秒である。表には式(4)で各時間の波パワーを求め、それを観測期間にわたって平均した平均波パワーも示している。また、表-2には気象庁ほか<sup>8), 9), 10)</sup>の波浪観測結果の一部も示している。図-2は、表-1, 2の観測地点の位置を示すものである。

### 3.2 平均波パワーの簡易計算式

各2時間毎の波パワーは、測定された $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ を用い、式(4)等により計算できる。また、観測期間内の平均波パワーは基本的にはその平均値として求めることができる。しかしながら、波の観測結果は有義波高や周期のある期間の平均値や標準偏差で示されていることが多い。これらの値からその期間の平均波パワーを直接求める近似式を以下のように提案する。

$$\bar{W}_1 = 0.5 r_s \bar{H}_{1/3} H_{dev} \bar{T}_{1/3} \quad (6)$$

ただし、 $\bar{H}_{1/3}$ は有義波高の平均値、 $\bar{T}_{1/3}$ は有義波周期の平均値である。また $H_{dev}$ は有義波高の標準偏差である。 $r_s$ は波パワーと $\bar{H}_{1/3}$ および $\bar{T}_{1/3}$ との関係を決める係数であり、ある基準となる年(1984年、データのない地点は他の年)の1年間のデータに基づいて各観測点ごとに求めている。 $r_s$ の値は、2.7に近く、 $r_s = 2.7$ としてすべての観測点について計算しても、計算される波パワーの値の誤差は小さい。表-2に示している平均波パワーは式(6)を用い $r_s = 2.7$ として計算した値である。なお式(6)は有義波高の変動係数 $\mu_H (= H_{dev}/\bar{H}_{1/3})$ を用いて以下のように書き換えることができる。

$$\bar{W}_1 = 0.5 r_s \mu_H \bar{H}_{1/3}^2 \bar{T}_{1/3} \quad (7)$$

変動係数 $\mu_H$ の値は観測地点によって異なるが、近接した海域では比較的近い値となると考えられる。たとえば、後述するように日本海側で $\mu_H$ は1.0に近く、太平洋側で0.5程度の値である。

### 3.3 沖合での波パワー

図-3は、波浪観測データに基づいて作成した日本周辺の波パワーの分布図である。ただし、

- ①水深が30 m以上の比較的深い地点の1984年までのデータを用いている。
- ②日本を図に示す総延長5200 kmの折れ線で囲み、各直線区間別に波パワーを求めた。

日本では、関係以北の太平洋側や、北陸東北の日本海側で波パワーが大きく10 kW/mを超すところもあることがわかる。日本周辺の波パワーの平均値は、約7 kW/m(約36百万kW)となる。なお、同様な図はすでに田端ら<sup>2)</sup>によって作成されている。ただし、田端らの図では

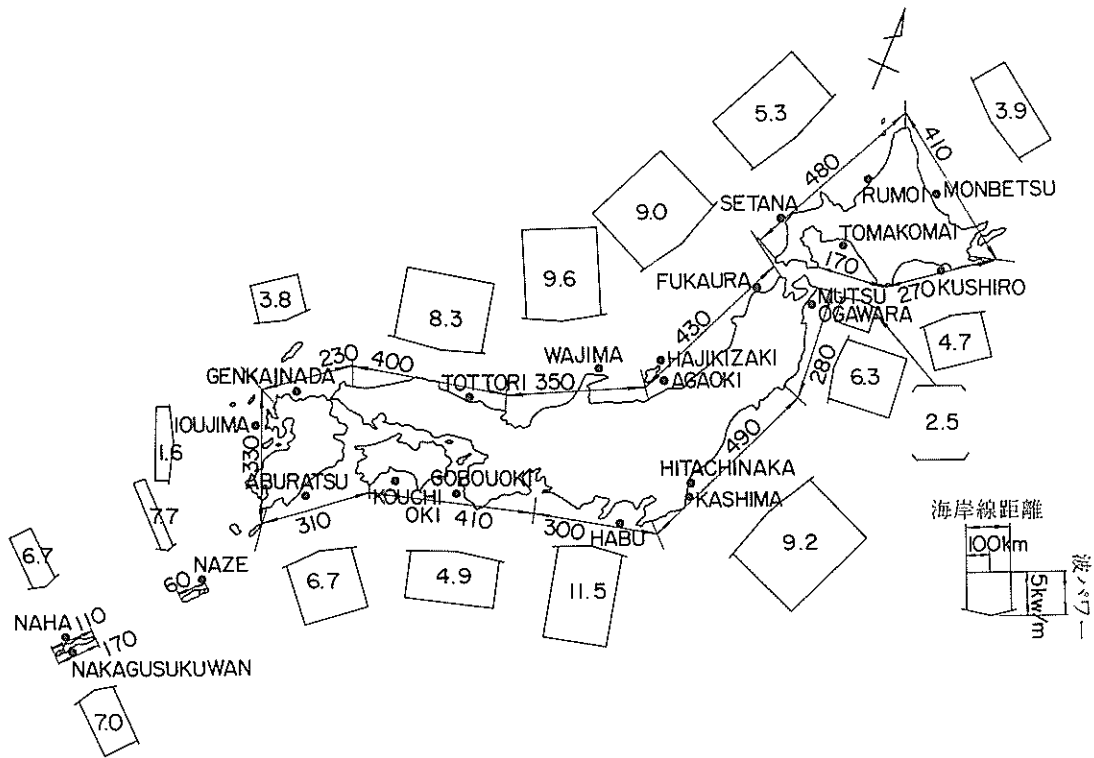


図-3 日本周辺の波パワー

やや浅い観測地点のデータに基づく波パワーもあり、新しいデータに基づいて作り直した。田端らの計算では、日本周辺の波パワーの平均値は約6kW/mである。

### 3.4 遮蔽された海域での波パワー

東京湾などの内湾や半島や島で遮蔽された海域では、波のパワーは外海に比して少ない。表-1と2にはそうした海域の観測結果も示されている。外海に面した海域と比較すると、遮蔽された海域での波パワーの特徴が以下のように指摘できる。

- ①東京湾の湾口部の浜金谷では、房総・三浦半島および大島の影響によって小さくなっており、波浮の15%以下となっている。湾内では、湾奥に行くほど外海の影響が小さくなり、湾口に近い横須賀沖では浜金谷の20%、湾奥の東京湾では浜金谷の10%程度となっている。有義波周期から考えても、東京湾では湾奥に行くほど、湾内発生波が波パワーの大部分を占めることがわかる。
- ②神戸港では御坊沖の10%以下である。大阪湾では外海の影響が東京湾よりもさらに小さく、湾奥の神戸港では湾内の発生波が波パワーの大部分を占めている。
- ③釜石港や宮古港ではむつ小川原よりかなり小さい。また、気象庁の江島のデータでは、1984年に12.3kW/m

であるが、それに比すと1/3以下である。釜石港や宮古港の波浪観測点はその湾口部にあるが、湾自体が岬や島によって囲まれているため小さくなっている。このように、岬や島による遮蔽効果はかなり大きい。

## 4. 日本周辺の波パワーの変動特性

### 4.1 波パワーの時系列変化

図-4(a)と(b)は、それぞれ鹿島港及び酒田港における1981年の有義波高と周期の時系列変化をみたものである。有義波高と周期の変化は著しく、酒田港では冬期と夏期の季節的な変化が大きいことがわかる。図-5(a)と(b)は、鹿島港および酒田港の波パワーの変化をみたものである。波パワーは、有義波高の2乗と周期の積に比例するため、その変化の幅は非常に大きい。ただし、鹿島港では酒田港に比べ変化は小さく、その特徴も異なる。鹿島港では、小さいときでも2kW/m程度はある。また、大きいときでも10~20kW/m程度のときが多く50kW/m以上となるのは少ない。酒田港では、夏期にはほとんど0に近い日が続くが冬期には20kW/mを超える日が多い。これは、冬期には大陸からの季節風が強いためである。

図-6(a)と(b)は、鹿島港と酒田港における月別の平均



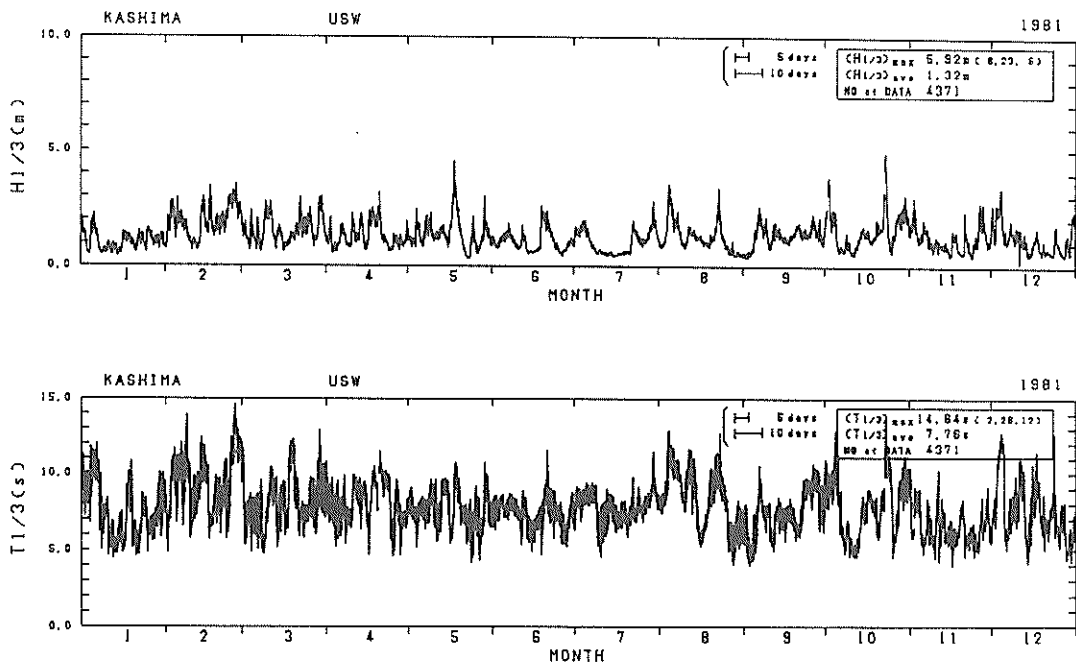


図 - 4 (a) 鹿島港における有義波高と有義波周期の変化(1981)

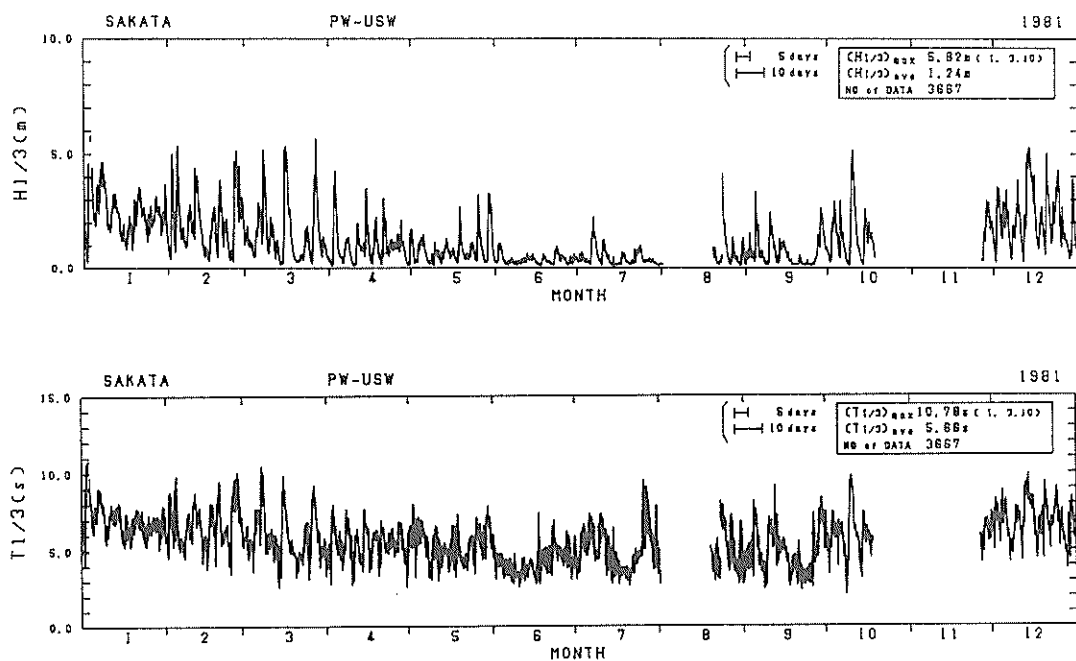


図 - 4 (b) 酒田港における有義波高と有義波周期の変化(1981)

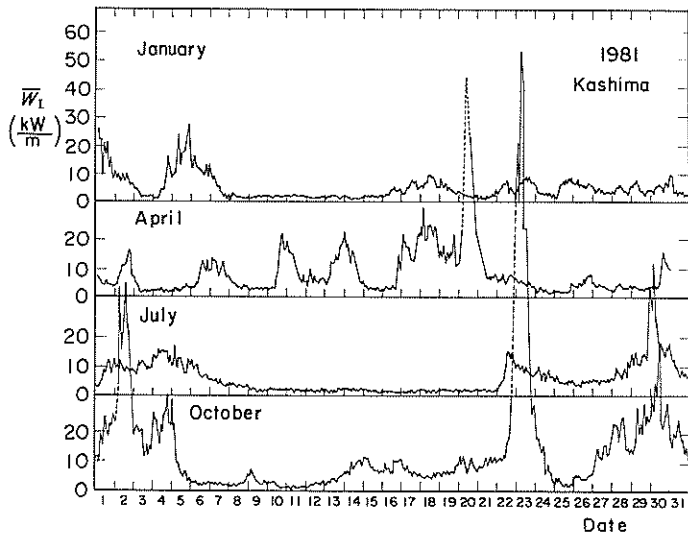


図 - 5 (a) 鹿島港における波パワーの変化 (1981)

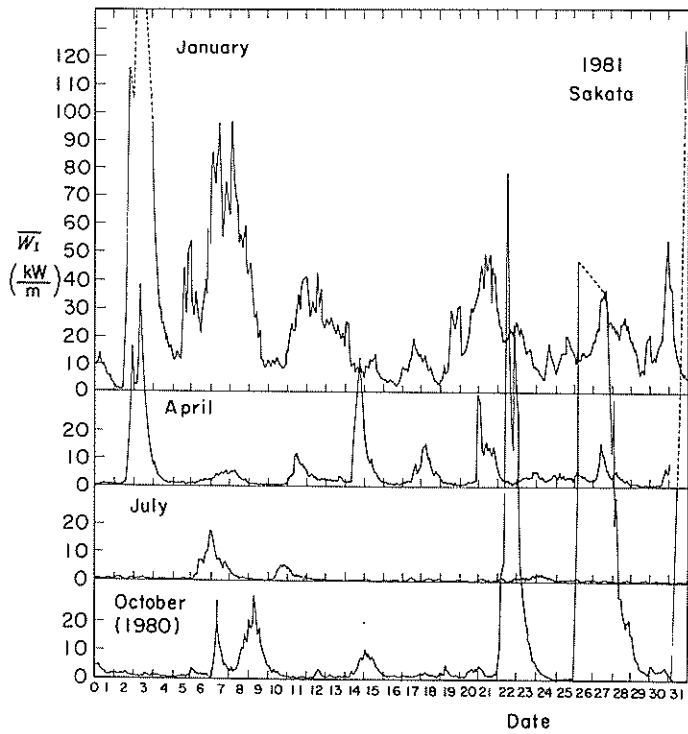


図 - 5 (b) 酒田港における波パワーの変化 (1981)

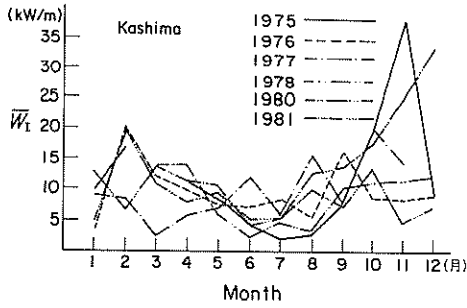


図 - 6(a) 鹿島港における波パワーの月別変化 (1981)

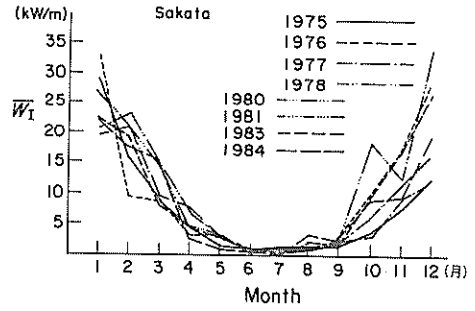


図 - 6(b) 酒田港における波パワーの月別変化 (1981)

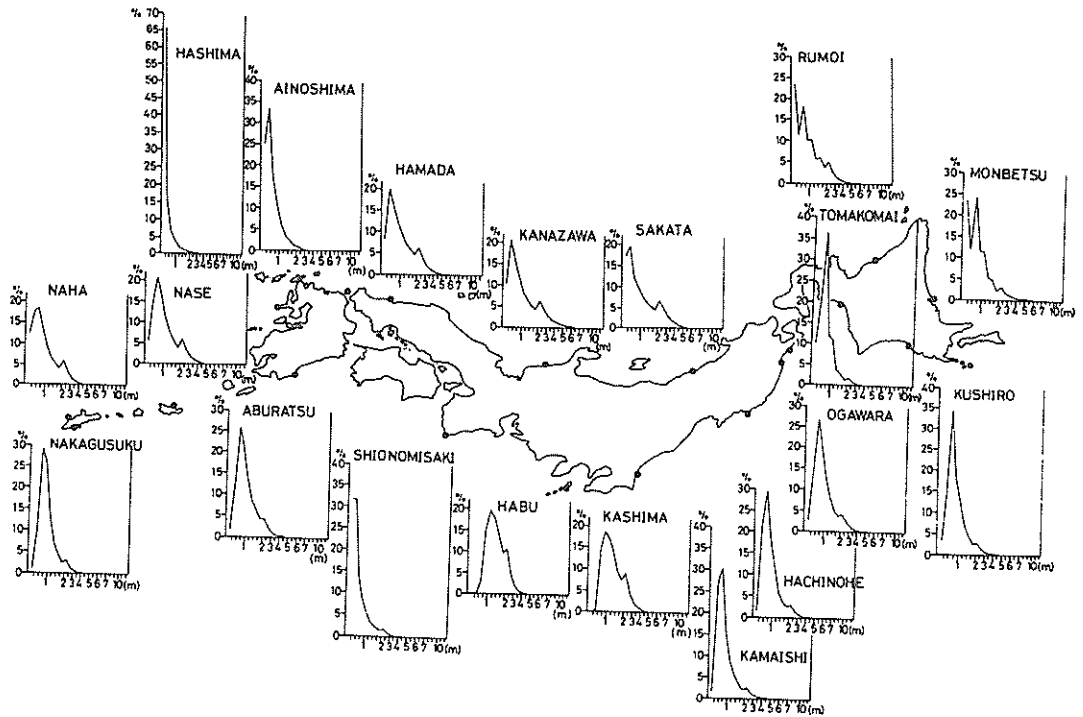


図 - 7(a) 日本周辺の有義波高の頻度分布

波パワーを示すものである。これらの図は、田端ら<sup>3)</sup>が作成したものにデータを追加したものである。すでに図 - 5(b)で示された酒田港における季節的な変動が明瞭に認められる。酒田港を含め、日本海側ではこうした季節的な変動が一般的に見られる。

図 - 6(a)と(b)によって年別の変化も検討することができる。各月の平均波パワーは毎年変化している。この図の期間内の年間平均波パワーの平均値と標準偏差は、鹿島港で11.0kW/mと2.1kW/m、酒田港で8.8kW/mと1.4kW/mである。

外海に面した地点における波パワーの変動性は、こ

で一部みたように日本海側と太平洋側で大きく異なる。本章では太平洋側の代表例として鹿島港、日本海側の代表例として酒田港を選び特にこの2港を例に変動性を検討する。

#### 4.2 有義波高・周期の頻度分布

前掲表 - 1には、各海域の有義波高の平均値と標準偏差、及び有義波周期の平均値が示してある。有義波高の変動係数(標準偏差/平均値)や有義波周期の平均値は、日本海側と太平洋側では大きく異なる。日本海側では変動係数が1.0に近いが、太平洋側では0.5程度である。また、日本海側では有義波周期の平均値が5~6秒

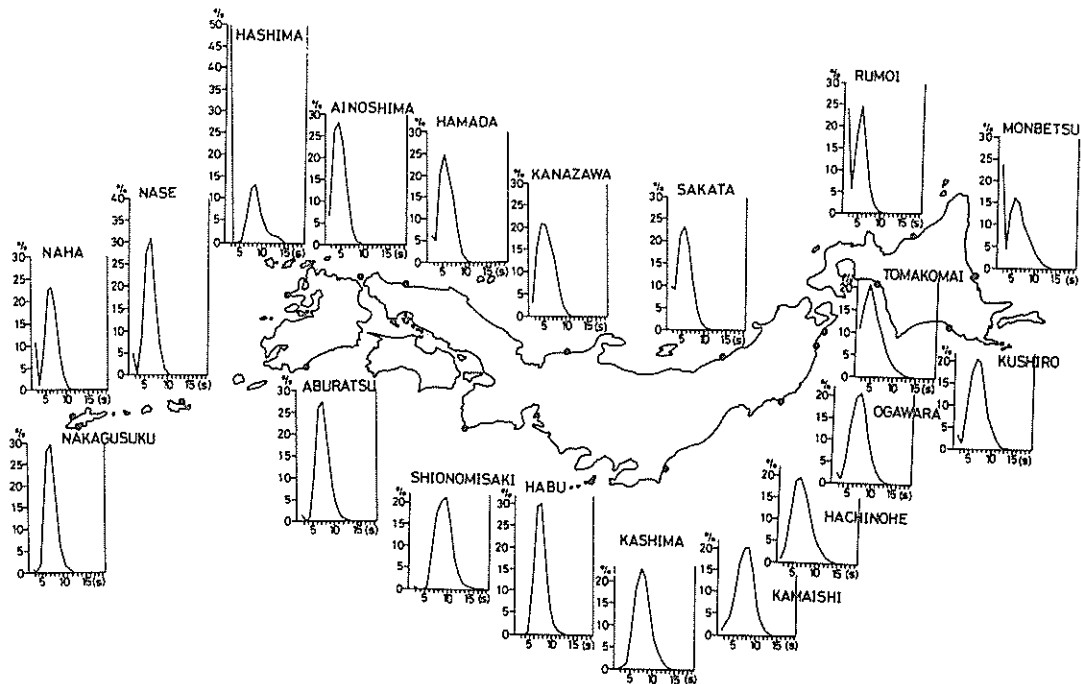


図 - 7 (b) 日本周辺の有義波周期の頻度分布

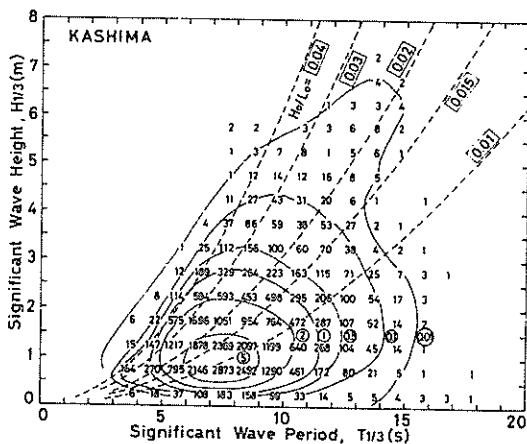


図 - 8 (a) 鹿島港における有義波高と周期の結合分布

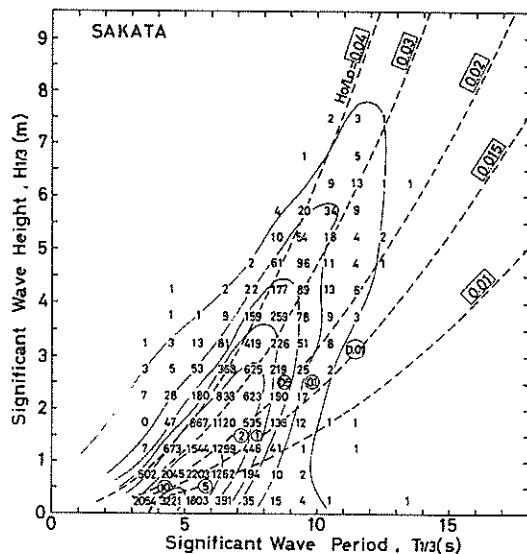


図 - 8 (b) 酒田港における有義波高と周期の結合分布

であるのに対し、太平洋側では7秒前後である。

広瀬らは<sup>5)</sup>、各海域の波浪特性を詳しく検討しており、上述した特性も指摘している。また図-7(a)に示す有義波高の頻度分布図を作成し、日本海側では有義波高が0m近くでピークとなるのに対し、太平洋側では1m付近でピークとなることを指摘している。さらに、図-7(b)の有義波周期の頻度分布図によって、日本海側では

有義波周期の頻度が6秒付近にピークがあり、10秒以上の頻度はごく小さいが、太平洋側では、頻度分布のピークが8秒付近にあり、14秒近くまでの周期があることを指摘している。

図-8(a)と(b)は、鹿島港と酒田港における有義波高と

有義波周期の結合分布図である。これらの図も広瀬ら<sup>5)</sup>によって作成されている。鹿島港ではどの有義波高のレベルにおいても有義波周期が7.5 s付近で頻度が大きく、10 sを超えるような長い周期の頻度も比較的大きいことがわかる。一方、酒田港では有義波高と有義波周期の相関が比較的大きく、有義波高が大きくなると有義波周期が長くなる傾向が顕著である。

#### 4.3 有義波高と波パワーの頻度分布

図-9(a)は、鹿島港における1976年から1982年の有義波高の確率密度 $f_H$ を示すものである。図には、 $f_H$ に各有義波高における波パワーの重みを乗じた値 $f_w$ も示している。この $f_w$ によって囲まれた面積が波パワーの平均値であり、10.1kW/mである。ただし、図の下方に示す各有義波高に対して平均的な有義波周期を用いて波パワーを計算している。鹿島港での13年間の有義波高の平均値は1.39mであり、中央値は1.10mである。一方、平均的な波パワーに相当する有義波高は1.65m、累積の波パワーが50%に達する有義波高は2mであり、いずれも平均の有義波高よりも大きい。波高が小さい場合には、その頻度が大きくても全体の波パワーにはあまり寄与せず、波

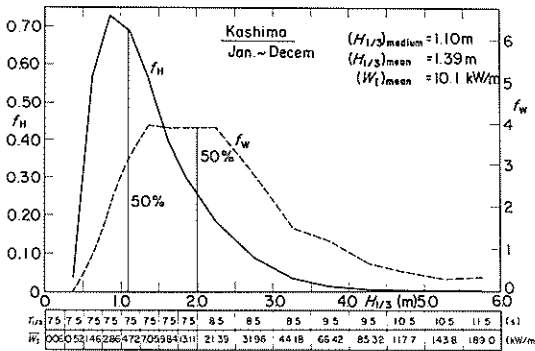


図-9(a) 鹿島港における有義波高と波パワーの頻度分布

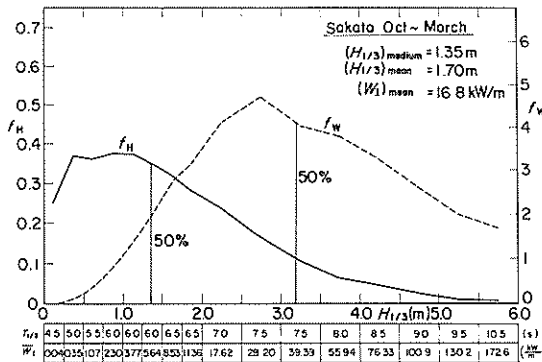


図-9(b) 酒田港における有義波高と波パワーの頻度分布

高が大きい場合の方が頻度が小さくても貢献度が大きいことが分かる。一般に、太平洋側では、平均波パワーの値に差があっても、鹿島港と同様な頻度分布の形となる。

図-9(b)は、酒田港の冬期(1970年から1982年の10月から3月)について調べたものである。鹿島港の場合に比して、有義波高の大ききなところでも頻度が大きい。したがって、波パワーの平均値も大きく、16.8kW/mである。なお、有義波高の平均値は、1.35m、平均の波パワーに相当する有義波高は、2.2mであり、累積の波パワーが50%に達するのは有義波高が3.2mのときである。このように、日本海側では冬期間に有義波高が大きいときが多く、平均の波パワーが大きい。

#### 4.4 波向き頻度分布と波パワー

図-10は、相馬港の1983年の波向き(中心波向き)の観測結果を示すものである。相馬港では、どの有義波高でもENEおよびEの波向きが卓越している。卓越波向きをEENEとすると、これより $\pm 30^\circ$ の波向きにはほとんどの波があることがわかる。波向きは波エネルギー変換装置に入射する波パワーを変化させるが、上述した波パワーの検討ではこの波向きの影響を考慮していない。酒田港や鹿島港での波向きのデータは十分でないので、こ

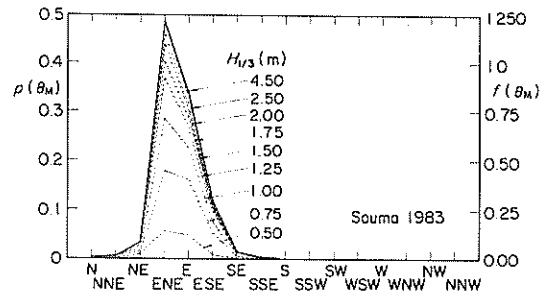


図-10 相馬港における中心波向きの頻度分布

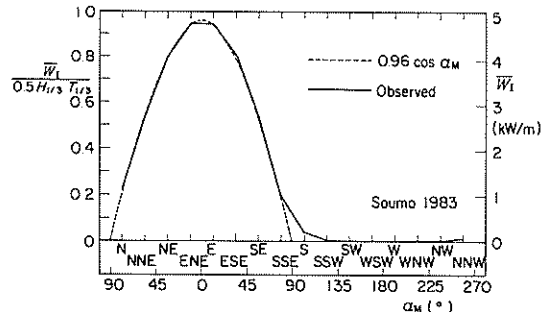


図-11 相馬港における波の入射角の影響

ここでは相馬港の観測結果に基づいて、波向きの影響を検討する。

図-11は、この観測位置に波エネルギー変換装置を設置した時に入射する波パワーの、その平面的な設置角度による変化をみたものである。図の横軸は卓越方向EEN Eとエネルギー変換装置の設置方向とのなす角度 $\alpha_M$ であり、縦軸は、それぞれの設置角度における波パワーをすべての波が装置に直角に入射したと仮定して得られる波パワーで除した値を示している。 $\alpha_M$ が $0^\circ$ であっても、波向きを考慮しない場合の96%になり、また $\alpha_M$ が $33^\circ$ であれば80%になることがわかる。図中の点線は観測結果を、関数、 $0.96 \cos \alpha_M$ で近似したものであり、相馬港ではこの関数で平均波パワーに及ぼす波向きの効果が求まることになる。波向きの観測データがあれば、こうした検討によって波向きの影響を考慮することができる。しかしながら、波向きを含む波浪観測が行われている地点は少なく、データが不足しているのが現状である。

なお、2.2に述べた波の方向分散性についても考慮する必要がある。この検討を行うためには、方向スペクトルが観測されていなければならない。しかし、方向スペクトルの観測は、ようやく数箇所の観測点で始まったばかりである。ただし、たとえばすべての波が $s_{max}=25$ 程度の方向集中度であるとすれば、2.2で述べたように波パワーは0.92倍になる。

## 5. 波パワーの変動とその利用

### 5.1 波エネルギーの変換（簡易）シミュレーション

波パワーの変動性は波エネルギー変換装置の設計において最も問題となる。しかしながら、波パワーの変動特性を適切に表す一般的な指標は無く、その変動に対して波エネルギー変換装置の出力がどう変動するかを一般的に把握することは簡単ではない。しかしながら、具体的な設置位置と変換装置の性能が与えられれば、波のデータに基づいて簡単な運転シミュレーションを行うことによって、波の変動性が変換装置に及ぼす影響を把握でき、装置の設計に反映させることができる。ここでは、2時間毎の波浪観測データを用いて、1台の波力発電装置による波力発電のシミュレーションを行い、変動性の影響について検討する。ただしシミュレーションは、以下の仮定に基づいて行っている。

- ①波力発電装置を酒田港の波浪観測点に設置した。装置の長さは20mである。
- ②波のデータは、冬期間（1980年10月から1981年3月）のデータである。
- ③波エネルギーから電気エネルギーへの変換効率は0.34である。
- ④発電機の定格は20mの装置に対して100kWである。定格を超える発電はできないと考え、かつ定格の10%以下の発電は停止すると考える。
- ⑤非常に大きな容量の蓄電装置を設けることとする。需要に応えることができる蓄電装置の最小の容量を『最小必要蓄電容量』と定義して、シミュレーションの中

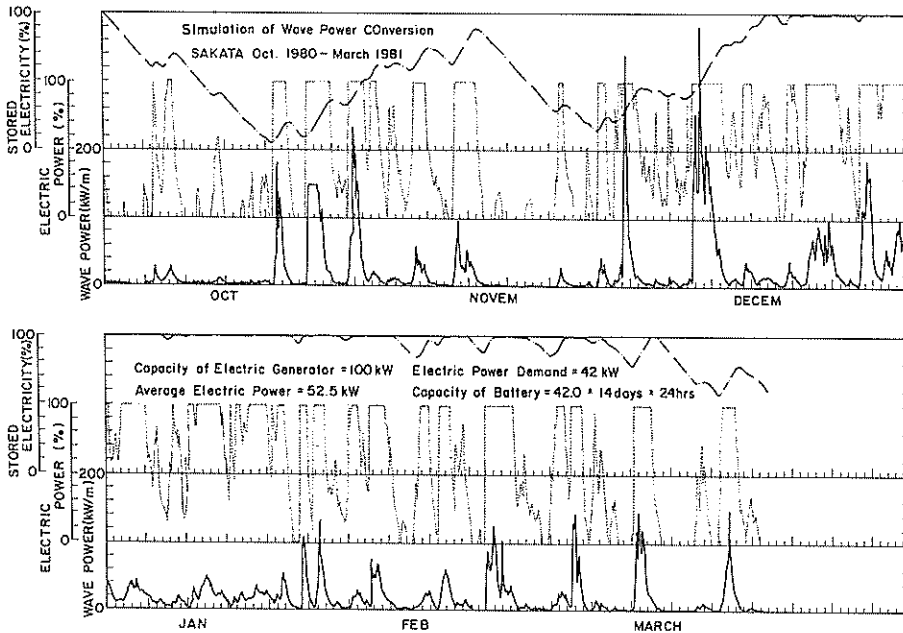


図-12 シミュレーション結果の例

でこれを見出す。

⑩発電された電力は蓄電装置に蓄えられるとともに、一定量が定期的に消費されるとする。発電機定格に対する平均発電量を『発電機稼働率』と称し、平均発電量に対する電力使用量を『使用率』と称する。発電機稼働率はシミュレーションの結果求まる。使用率をここ

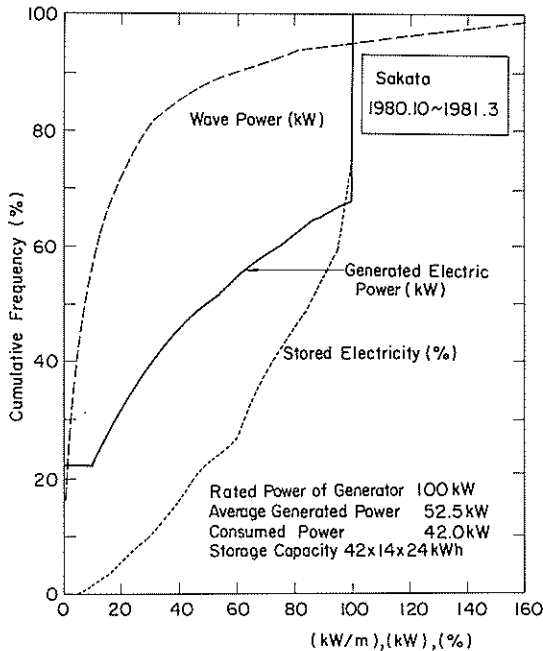


図-13 シミュレーションによる波パワー、発電量、蓄電量の累積度数分布

では80%として与えた。

図-12はシミュレーションの結果を示すものである。平均波パワーは20mの装置長さに対して42kW、平均発電量は52.5kWであり発電機定格が100kWであるので稼働率は52.5%となる。また、使用率を80%としたので電力使用量は42kWとなる。さらに最小必要蓄電容量は、14日分の電力使用量に相当する14112kWh (=14×24h×42kW)である。図には、入射波パワー、発電量(出力)、蓄電量が示してある。10月初旬の波パワーは小さく発電量は使用量より小さい。その結果、蓄電量は減少を続けほとんどゼロになってしまう。波パワーは11月の下旬にも小さくなり発電量が低下する。しかし、12月から3月の間は波パワーが大きく、発電機はほぼ定格で稼働し、蓄電量も容量の100%となることが多い。蓄電量が100%に達すると、それを越す電力はダミーの抵抗負荷によって消費される。

図-13は、波パワー、発電出力そして蓄電量の累積度数分布図である。発電出力が0でないとき(運転時間率)が78%、定格出力のとき(定格運転時間率)が32%となっている。発電出力は、高出力時ほどその頻度が低くなるのがわかる。また蓄電量は、その量が大きいきほど頻度が低くなるようである。ただし、蓄電量はその容量の100%以上とはならず、発電が過剰となるときが25%ある。

## 5.2 発電出力の変動の指標と変動の制御

『発電機の稼働率』、『最小必要蓄電容量』そして『運転時間率』や『定格運転時間率』などは、発電出力の変動の具体的な指標として重要である。これらは、発電機

表-3 酒田港の波データによるシミュレーション結果

平均有義波高=1.84m, 周期=6.4s, 波パワー=21.2kW/m(424kW/20m)

定格 (kW)	平均発電量 (kW)	運転時間率 (%)	定格運転時間率 (%)	電力使用量 (kW)	最小必要蓄電容量 (日)	充電運転時間率 (%)	過充電運転時間率 (%)	総波エネルギー利用率 (%)	合
200	74.45(37.2%)	69	17	74.45(100%)	24	39	6	17.6	
200	74.5	69	17	59.6(80%)	17	45	19	14.1	
200	74.5	69	17	37.2(50%)	14	55	40	8.8	
100	52.5(52.5%)	78	32	52.5(100%)	22	49	7	12.4	
100	52.5	78	32	42.0(80%)	14	53	25	9.9	
100	52.5	78	32	26.2(50%)	10	63	49	6.2	
80	45.8(57.3%)	81	38	45.8(100%)	22	51	7	10.2	
80	45.8	81	38	36.6(80%)	13	56	28	8.6	
80	45.8	81	38	22.9(50%)	7	66	52	5.4	
50	33.1(66.2%)	86	50	33.1(100%)	19	58	9	7.8	
50	33.1	86	50	26.5(80%)	10	62	33	6.3	
50	33.1	86	50	16.6(50%)	7	71	58	3.9	

表-4 鹿島港の波データによるシミュレーション結果  
 平均有義波高=1.32m, 周期=7.8s, 波パワー=9.04kW/m(181kW/20m)

定格 (kW)	平均発電量 (kW)	運転 時間率 (%)	定格運転 時間 (%)	電力使用量 (kW)	最小必要 蓄電容量 (日)	充電運転 時間率 (%)	過充電運転 時間率 (%)	総波エネルギー 利用率(%)
100	46.4 (46.4%)	88.6	15.5	46.4(100%)	25	42.76	7.19	25.6
100	46.4	88.6	15.5	37.2(80%)	13	52.67	24.63	20.5
100	46.4	88.6	15.5	23.3(50%)	12	70.80	55.25	12.9
100	46.4	88.6	15.5	9.3(20%)	10	88.61	80.16	5.1
50	34.5 (69.0%)	98.0	40.0	34.5(100%)	17	55.73	10.05	19.1
50	34.5	98.0	40.0	27.6(80%)	10	64.84	37.90	15.2
50	34.5	98.0	40.0	17.3(50%)	7	78.56	69.52	9.6
50	34.5	98.0	40.0	6.9(20%)	3	95.14	92.24	3.8
10	9.7 (97.0%)	99.0	88.6	9.7(100%)	5	89.41	26.69	5.4
10	9.7	99.0	88.6	7.7(80%)	2	93.49	86.83	4.3
10	9.7	99.0	88.6	4.8(50%)	1	98.22	97.60	2.7
10	9.7	99.0	88.6	1.9(20%)	1	99.82	99.82	1.0

の『定格』や『使用率』によって変化する。表-3は、これらの値を換えてさらに行ったシミュレーションの結果である。表には平均発電量と発電機稼働率\*, 運転時間率\*, 定格運転時間率, 使用量と使用率, 最小必要蓄電容量(日単位), 充電運転時間率, 過充電運転時間率そして総合波エネルギー利用率(使用電力量/装置への波の平均入射パワー)が示してある。たとえば、図-13の発電機定格100kW, 使用率80%の例では、システムは78%の時間運転でき、32%の時間は定格出力となる。また、発電機の稼働率は52.5%で最小必要蓄電容量は14日分となる。一方、発電機定格が80kWで使用率が50%の場合には、発電機稼働率は57.3%, 最小必要蓄電容量は7日分となり、システムは81%の時間運転でき、38%の時間が定格運転となる。発電機定格と使用率が小さい時には、出力の変動は小さい。しかしながら平均発電量は小さくなる。総合波エネルギー利用は前者の例では9.9%, 後者の例では5.4%となる。

表-4は、鹿島港の1981年の波のデータに基づいた同様なシミュレーション計算の結果である。酒田港の半年間の波のデータを用いた場合に比べ、平均出力は小さいが変動性は小さい。したがって、表-3の同じ発電機定格や使用率の場合の値に比べ、表-4の発電機稼働率はやや小さく、最小必要蓄電容量もやや小さく、総合波エネルギー利用率は2倍程度と大きい。なお鹿島では、システムが年間を通じて稼働できることに留意する必要がある。表-4には発電機定格が10kWの場合も示している。定格がごく小さければ、ほとんどの時間定格で運転

することができ、必要な蓄電容量も1日以下と小さいことがわかる。これは、必要なエネルギーが小さいシステムにとっては有利な点である。

### 5.3 変動する波パワーの利用法

低コストで大容量のエネルギー貯蔵装置が、波エネルギーの利用にとって不可欠である。しかしながら、そうした装置は現在開発中であり、完成までにはまだ多くの問題があるようである。波エネルギーの利用を促進するためには、その開発を単に持つだけでなく、以下に挙げるような他の手段を考慮しなければならない。

- ①得られたエネルギーを波エネルギーの変動と同じ変動をする用途に用いる。例えば、港内侵入波の消波や海浜や航路の砂の移動を制御するエネルギーとして用いる。
- ②得られたエネルギーを、定常的に必要でない需要や年間を通じては必要としない用途に用いる。例えば、導水による港内の水質向上をはかるエネルギーとして用いる。
- ③得られたエネルギーを補助エネルギーとして用いる。例えば、離島の火力発電を補助するエネルギーとして用いる。
- ④得られたエネルギーを他のエネルギーに変えて利用する。例えば電力に変換した後、水を電気分解して水素ガスに変換することも考えられる。また、海水を淡水に変えて淡水の形で蓄えることもできる。また、高圧の空気として貯蔵することもできる。

\* 電気関係の用語の定義では発電機稼働率を発電機利用率といい、運転時間率を稼働率という。



## 6. 結 論

本資料の主要な結論は以下のとおりである。

- ①波パワーは、有義波高と有義波周期から式(8)のように表すことができる。また、年間の平均波パワーは有義波高の平均値と標準偏差および有義波周期の平均値を用いて式(8)で近似的に求めることができる。
- ②日本周辺の平均的な波パワーは図-3のように表される。日本周辺の波パワーの総平均量は3600万kWであり、これを日本を囲む折れ線の長さ5200kmで除した値は、約7kW/mである。波パワーは、関東以北の太平洋岸と北陸・東北の日本海側で大きい。
- ③波パワーの変動性は大きく、日本海側では季節的な変動も大きい。波向きの変動性にも留意する必要がある。
- ④波エネルギー変換装置の運転シミュレーションは、波高の変動による変換装置への影響を具体的に知るために重要である。特に、シミュレーションによって得られる発電機稼働率、最小必要蓄電容量として運転時間率や定格運転時間率などは変換出力の変動を表す適切な指標である。変換出力の変動は、変換装置の定格やエネルギーの使用率を小さくすれば小さくできるが、平均出力は小さくなる。
- ⑤波エネルギーの利用を促進するには、低コストで大容量の蓄電装置が必要であるが、その他の手段による利用の促進をはかることも重要である。

波エネルギーの利用システムの適切な設計には、良質の波浪観測データが不可欠である。幸い我が国では精力的な観測が運輸省港湾局・港湾建設局等によって行われており、貴重な資料となっている。しかしながら、有義波高や周期だけでなく、波向きや波の方向スペクトルの測定も必要であり、今後の観測の発展が望まれる。最後に、波浪データを提供して頂いた運輸省港湾局、港湾建設局、港湾技術研究所の各位に深甚なる感謝の意を表します。また、本資料を取りまとめるにあたっては、沿岸開発技術研究センターで行われた、「波エネルギーの利用に関する総合調査委員会<sup>11)</sup>」の合田良実委員長（当時港湾技術研究所所長）をはじめとする各委員から貴重な助言を得ている。さらに、港湾技術研究所の谷本勝利水工部長や小舟浩治海象調査研究室長にも貴重な助言を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

(1989年3月31日受付)

## 参考文献

- 1) 高橋重雄・安達崇・田中智：改良型波力発電ケー

ン防波堤の特性—波エネルギーの利用に関する研究、第7報— 港湾技術研究所報告、第27巻第2号、1988.6, pp.23~57.

- 2) 合田良実・辻垣武彦・干山善行・島田知明・高橋重雄・鈴木博史・高木栄一：波力発電ケーソン防波堤を用いた波エネルギー利用システム実証実験、第14回海洋開発シンポジウム論文集、1989.6, 投稿中.
- 3) 田端竹千穂ほか：日本沿岸における波のエネルギー、港湾技研資料No.364, 1980, 20p.
- 4) 合田良実：沿岸波浪の統計的性質、第1回波浪エネルギー利用シンポジウム、1984, pp.19~31.
- 5) 広瀬宗一ほか：観測結果に基づく沿岸波浪の出現特性、昭和57年度港研講演会講演集、1982, pp.1~55.
- 6) 合田良実：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、1977, 237p.
- 7) 菅原一晃・小舟浩治ほか：沿岸波浪観測15か年統計（昭和45年~59年）、港湾技研資料No.554, 1986, 872p.
- 8) 気象庁：波浪観測結果、No.1~8, 1977~1984.
- 9) 運輸省第二港湾建設局：東京湾における波浪観測結果、1985, 120p.
- 10) 東京都港湾局：東京港波浪観測調査結果、1987, 150p.
- 11) 合田良実・桜井正憲・森 好生・松沢直求：波力エネルギー利用に関する総合調査、第2回波浪エネルギー利用シンポジウム、1987, pp.249~258.

## 主要記号表

$C_g$	: 波の群速度
$C_{g0}$	: 深海における波の群速度
$f$	: 波の周波数
$f_H$	: 波高の頻度
$f_w$	: 波パワーの重み付きの波高の頻度分布
$g$	: 重力加速度
$G(f; \theta)$	: 波のスペクトルの方向関数
$h$	: 水深
$H$	: 波高
$H_0$	: 深海における波高
$H_{1/3}$	: 有義波高
$\bar{H}_{1/3}$	: 有義波高のある期間の平均値
$H_{\sigma}$	: 有義波高のある期間の標準偏差
$L_{op}$	: 周波数スペクトルにおけるピーク周波数に対応する深海における波長
$r_s$	: 換算係数 (式(6)と(7))
$S(f; \theta)$	: 波のスペクトル

- $s_{max}$  : 光易型方向関数における方向集中度を示すパラメータ  
 $T$  : 波の周期  
 $T_{1/3}$  : 有義波周期  
 $\overline{T}_{1/3}$  : 有義波周期のある期間の平均値  
 $\overline{W}_i$  : 波のパワー  
 $\alpha_M$  : 変換装置への波の入射角  
 $\beta_b$  : 波パワーの砕波による減衰率  
 $\rho_w$  : 水の質量  
 $\kappa_d$  : 中心波向きと方向分散性による波パワーの変化を示す係数  
 $\kappa_d'$  :  $=\kappa_d/\cos \theta_M$   
 $\kappa_w$  : 水深による波パワーの変化を示す係数  
 $\mu_H$  : 有義波高の変動係数 ( $=H_{sw}/H_{1/3}$ )  
 $\theta$  : 波向き  
 $\theta_M$  : 中心波向き (変換装置への波の入射角を表す場合もある。)

港湾技研資料 No. 654

1989・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 奥村印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.