

日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察

高橋重雄*・安達 崇**

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存在し、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。たとえば、近藤ら(1988)は振り子式の波エネルギー変換装置の開発を行っており、著者ら(高橋ほか(1988); 合田ほか(1989))も固定式 OWC 型の装置の開発を行っている。

波エネルギー変換装置の設計をする場合には、入射する波のエネルギーを知ることが不可欠である。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。本報告では、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した。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調べている。ただし波エネルギーの変動性には、波の不規則性による変動と気象変化に伴う変動があり、ここでは特に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。

波エネルギーの利用にとって、波エネルギーの変動は大きな障害となるが、波エネルギー変換装置に対するこの変動性の影響を表す適切な指標は無い。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波力発電シミュレーションを行い、変動性の影響を検討した。

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(1980)、合田(1984)、広瀬ら(1982)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にする。

2. 波と波パワー

波パワー (波エネルギー輸送率) は、電線中を送られてくる電気のパワーと同じくワット (W, Nm/s) の単位を持つ。ただし波エネルギー変換装置 1m 当りの入射波パワーは、W/m の単位を持つ。実際の海の波は不規則であり、しかも方向分散性をもつ波であり、方向スペク

トルによって表される。その波パワーは、方向スペクトルと各成分波の群速度との積を積分したものとなる。ただし、方向スペクトルをもつ波の入射パワーは次式のようにその有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ によっても表すことができる。

$$\bar{W}_I = \kappa_d \kappa_w H_{1/3}^2 T_{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 κ_d は中心波向き θ_M と方向分散性による波パワーの変化、 κ_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、計算することができる。ただし、 $H_{1/3}$ は m、 $T_{1/3}$ は s、 $\bar{W}_I$ は kW/m の単位で表している。

図-1(a) と (b) は、方向スペクトルが Bretschneider-Mitsuyasu 型の周波数スペクトルと Mitsuyasu 型の方向関数の積で表される標準的な場合について、 κ_d 、 κ_w を算定したものである。ただし、(a) では κ_d を $\kappa_d = \kappa_d' \cos \theta_M$ として κ_d' で示している。 κ_d' は θ_M と光易型方向関数における S_{max} の関数として示される。また、(b) の κ_w は横軸を h/L_{op} にとっており、 h は水深、 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。たとえば水深の深い沖合で、方向分散性が非常に小さい波であるとき、 $\kappa_w = 0.44$ 、

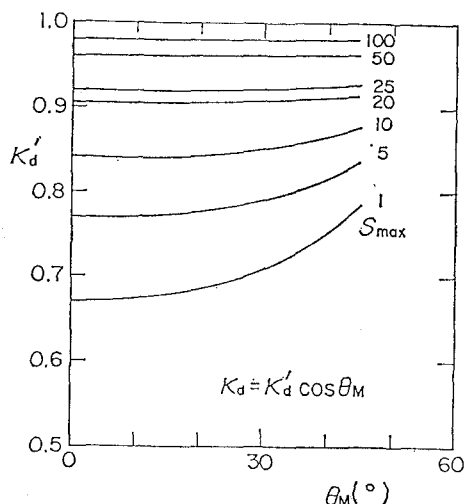
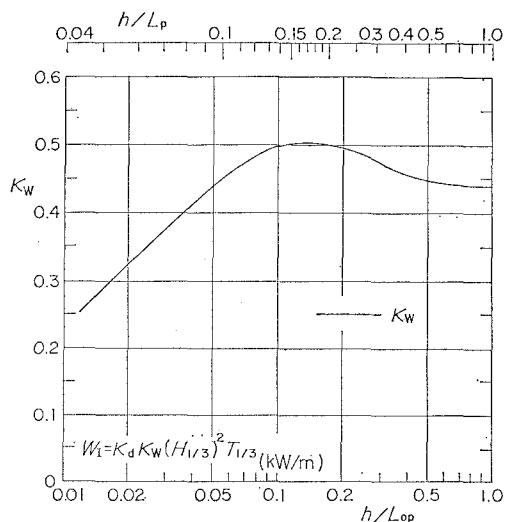


図-1 (a) S_{max} と θ_M に対する κ_d' の変化

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長

** 運輸省港湾技術研究所 水工部
海洋エネルギー利用研究室

図-1 (b) h/L_{op} に対する K_w の変化

$\kappa_d = 1.0 \cos \theta_M$ となり、入射波パワーは $0.44 H_{1/3}^2 T_{1/3} \cos \theta_M$ となる。また、 $\kappa_w \kappa_d = 0.5$ 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く、 $\theta_M = 0^\circ$ として求められたものであり、式(1)のほぼ上限を表す。

3. 日本周辺の波パワー

運輸省港湾局では、日本各地の港湾およびその沖合において波浪観測を行っている。そのうちの約40地点のデータを港湾技術研究所で集中処理を行っている(菅原ら, 1986)。観測は、2時間毎に20分間行われ、有義波高や周期が求められている。図-2は、そのデータに基

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、各直線区間に波パワーを求めた。
- ③ 各2時間毎の波パワーは、基本的には測定された $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ を使い、 $\kappa_d \kappa_w = 0.5$ として式(1)で計算した。
- ④ 観測期間の平均波パワーは、各2時間毎の平均波パワーの平均値である。

図-2によって、日本では関東以北の太平洋側や北陸東北の日本海側で、波パワーが大きいがわかる。日本周辺の波パワーの平均値は、約 7 kW/m となり、日本全体では 36 百万 kW である。田端ら(1980)は、同様な計算をしているが、やや浅いところの観測データも含んでおり、今回の値よりやや小さい。

なお、観測期間の平均波パワーは、以下に示す式(2)で近似的に求めることもできる。

$$\begin{aligned} \bar{W}_I &= 0.5 r_s \bar{H}_{1/3} H_{dev} \bar{T}_{1/3} \\ &= (0.5 r_s \mu_H \bar{H}_{1/3}^2 \bar{T}_{1/3}) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 $\bar{H}_{1/3}$ は平均の有義波高、 $\bar{T}_{1/3}$ は平均の有義波周期である。また H_{dev} は有義波高の標準偏差であり、 μ_H は変動係数 ($H_{dev}/\bar{H}_{1/3}$) 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、ある基準となる年の1年間のデータに基づいて各観測点ごとに求めた。 r_s の値は 2.5 から 3.0 程度で平均的に約 2.7 である。 μ_H は海域によって異なり、たとえば鹿島ではおよそ 0.5 であり、酒田ではおよそ 0.9 である。

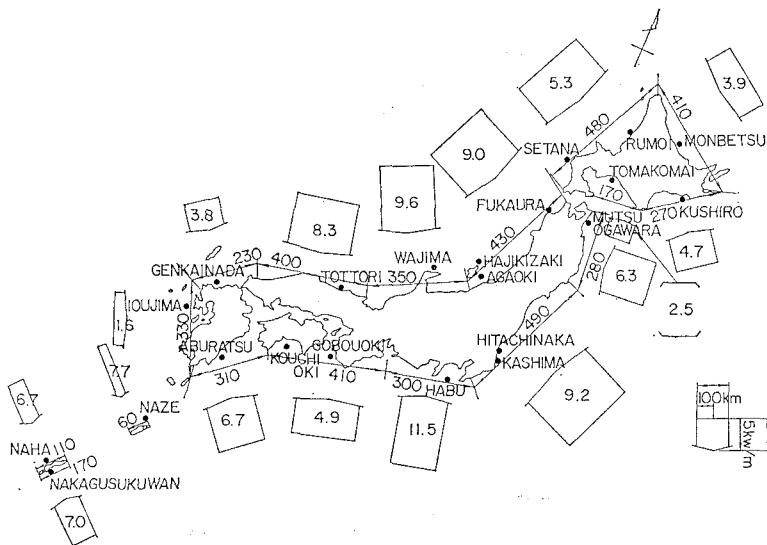


図-2 日本周辺の波パワー

4. 波パワーの変動性

波の有義波高や周期は時々刻々変化し、変動性は大きい。波パワーはそれらの積であり変動性はさらに大きい。たとえば鹿島港では、図-3 に示すように波パワーが小さい時には約 2 kW/m であるが大きい時には 20 kW/m を超える。ただし 50 kW/m を超えるのは少ない。このような変動は太平洋沿岸の特徴である。一方日本海沿岸では、夏季にはほとんどないが冬季に大きくなる

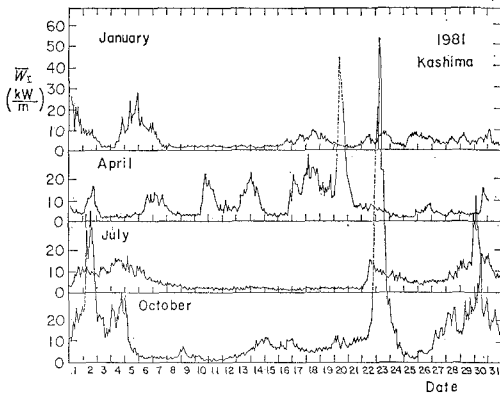


図-3 鹿島港における波パワーの変化(1981)

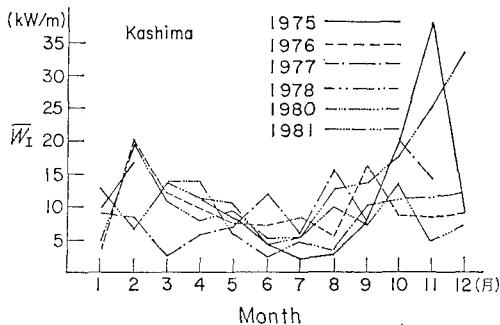


図-4 (a) 鹿島港における波パワーの月別変化

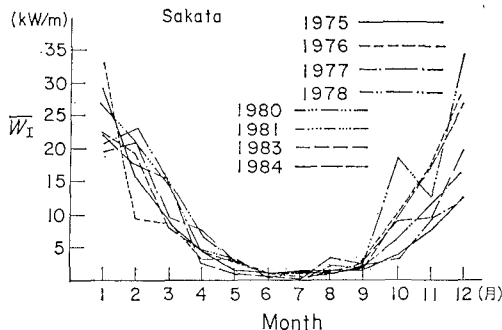


図-4 (b) 酒田港における波パワーの月別変化

という季節変動が顕著である。たとえば酒田港では、夏季にはほとんど零の日が続くが、冬季には 20 kW/m を超え 100 kW/m に達することもある。図-4 (a) と (b) はそれぞれ鹿島港と酒田港の月別平均波パワーを示すものであり、酒田港において波パワーの季節変化が顕著であることがよくわかる。

図-5 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、 10.1 kW/m である。ただし、図の下方に示す各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 1.39 m であり、中央値は 1.10 m である。一方、平均的な波パワーに相当する有義波高は 1.65 m であり、累積の波パワーが50%に達する有義波高は 2 m であり、いずれも平均の有義波高より大きい。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。

波パワーの変動を考えると、波向きの変動も重要である。ここでは詳しく述べることができないが、相馬港を例にその特性を調べた。相馬港では、波向きとその変動を考慮しない場合の波パワーに $0.96 \cos \alpha_M$ を乗じることによって、それらを概略考慮できることがわかった。ただし、 α_M は卓越波向き EENE と装置のなす角度である。波向きについては観測データが乏しく、波向き観測の充実が望まれる。

5. 波パワーの変動とその利用

(1) 波エネルギー変換シミュレーション

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なく、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

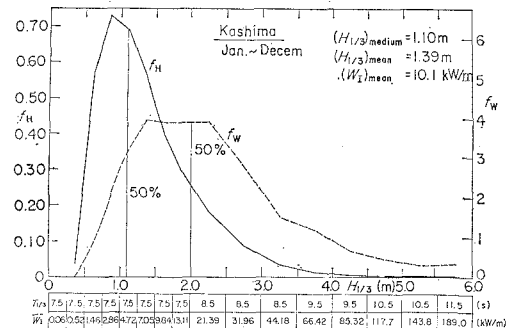


図-5 鹿島港における有義波高と波パワーの頻度分布

に把握することは簡単ではない。しかしながら、変換装置の具体的な設置位置と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ができる。これによって、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、冬季間（1980年10月から1981年3月）のデータである。夏季は運転できないと考える。
- ③ 波エネルギーから電気の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。需要に答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でこれを見出す。
- ⑥ 発電された電力は蓄電装置に蓄えられるとともに、

一定量が定常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の比を使用率と称する。発電機稼働率はシミュレーションの結果求まる。使用率をここでは80%として与えた。

図-6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424kW、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（ $=14 \times 24 \times 42 \text{ kW}$ ）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。

（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

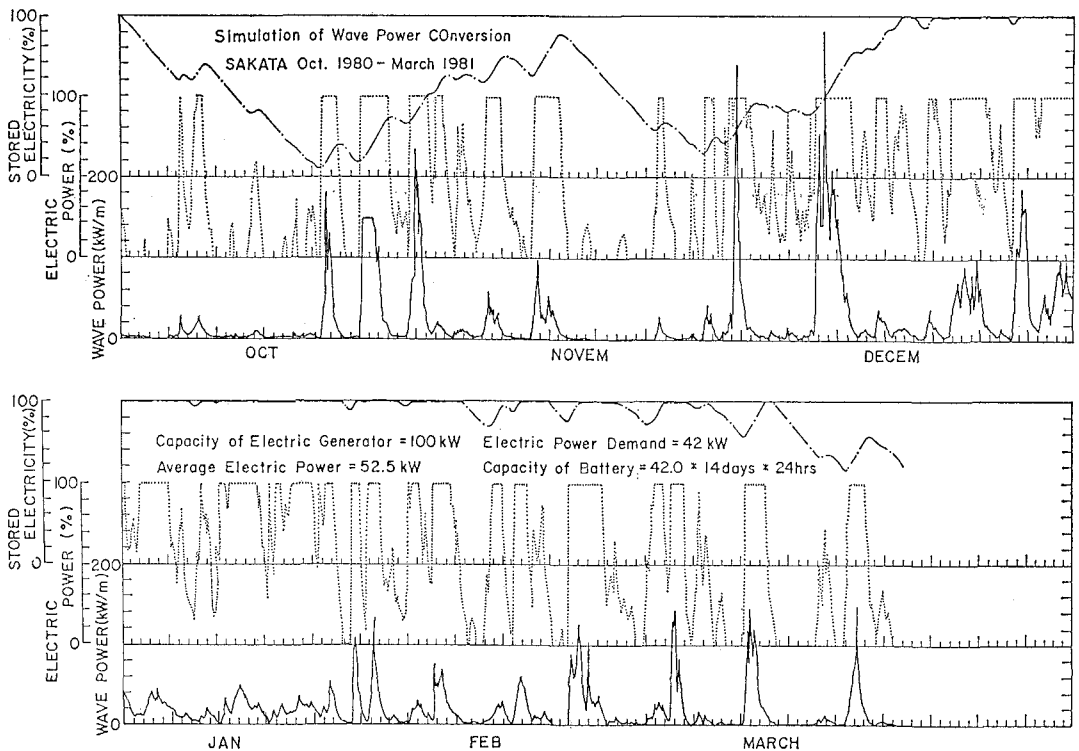


図-6 波力発電シミュレーション結果（酒田港）

表-1 波力発電シミュレーション結果 (酒田港, 鹿島港)

港 名	発電機 定格 (KW)	平均発電量 (稼働率) (KW)	運 転 時間率 (%)	定格運転 時間率 (%)	使用量 (使用率) (KW)	最小必要 蓄電容量 (日)	総合波エネルギー 利用率 (%)
酒 田 港	200	74.5(37.2%)	69	17	74.5 (100%)	24	17.6
	100	52.5(52.5%)	78	32	52.5 (100%)	22	12.4
					42.0 (80%)	14	9.9
	80	45.8(57.3%)	81	38	45.8 (100%)	22	10.2
					22.9 (50%)	7	5.4
鹿 島 港	50	33.1(66.2%)	86	50	33.1 (100%)	19	7.8
	100	46.4(46.4%)	88.6	15.5	46.4 (100%)	25	25.6
					37.2 (80%)	13	20.5
	50	34.5(69.0%)	98.0	40.0	34.5 (100%)	17	19.1
	10	9.7(97.0%)	99.0	88.6	9.7 (100%)	5	5.4
					1.9 (20%)	1	1.0

動の具体的な指標として重要である。これらは、発電機の『定格』や『使用率』によって変化する。表-1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-1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)、そして総合波エネルギー利用率が示してある。たとえば、図-6の酒田港における発電機定格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80kWがで使用率が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率は前者の例で9.9%、後者の例で5.4%となる。

また表-1には、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結果も示している。鹿島港の場合、酒田港の半年間の波のデータを用いた場合に比べ、平均波パワーが181kWと小さいため平均出力は小さいが変動性は小さい。したがって、酒田港の同じ発電機定格或使用率の場合の値に比べ、鹿島港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。鹿島港については発電機定格が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利用システムにとっては有利な点である。

(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、その開発を単に待つだけでなく、他の手段を考慮しなければならない。たとえば、波エネルギーの変動と同じ変動をする用途に用いたり、他のエネルギーに変えて利用することなども考えられる。

6. あとがき

本報告をまとめるにあたり、運輸省港湾局・港湾建設局より波浪データを提供して頂いた。また、港湾技術研究所の合田良実前所長および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。

参 考 文 献

- 合田良実 (1984): 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, pp. 19~31.
- 合田良実・神田勝己・干山善行・大根田秀明・高橋重雄・鈴木博史・高木栄一 (1989): 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.
- 近藤俊郎・渡部富治・谷野賢二 (1988): 防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究 (5), 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 842~846.
- 菅原一晃・小舟浩治ほか (1986): 沿岸波浪観測 15 年統計 (昭和45年~59年), 港湾技研資料 No. 554, 872 p.
- 高橋重雄・安達 崇 (1988): 固定式振動水柱式波力発電システムの設計と実験的検証, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 837~841.
- 田端竹千穂ほか (1980): 日本沿岸における波のエネルギー, 港湾技研資料 No. 384, 20 p.
- 広瀬宗一ほか (1982): 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, pp. 1~55.