

波浪発電に関する基礎研究

Fundamental Research on Wave Energy Extractor

前田 久明*

Hisaaki Maeda

1. まえがき

海洋波のもつ波浪エネルギーとはどのようなものか。現実の海洋波は不規則波である。このような不規則波のもつエネルギーはどのように表現されるのか。波浪エネルギーを利用する場合、その賦存量が気になるところである。波浪エネルギーの賦存量は日本近海でどのように分布しているのか。以下にこのような問題を取り扱う理論を解説し得られた結果を示す。

さらに、波浪エネルギーを利用する場合、何らかの力学的エネルギーに変換しなければならない。この変換のメカニズムはどのようになっているのであろうか。この問題を扱う理論を波浪発電理論と呼ぶことにする。規則波中ならびに不規則波中での波浪発電理論について解説を行う。

2. 波浪エネルギーの賦存量

2.1 波浪エネルギーとは

波浪エネルギーは主に海面上を吹く風のエネルギーから変換されたものである。海面に風が吹くと海面は静水面から変形する。風が吹けば海面に波ができる。海面は変形すると、元の平面に戻ろうとする復原力が働く。すなわち海面の変形はポテンシャルエネルギーが貯えられたことを意味する。また海面の動的変形に伴い、海水中の流体粒子は運動することになる。これすなわち流体粒子に運動エネルギーが与えられたことを意味する。ここでいう海面の変形とは海洋波にはかからない。

このように波浪エネルギーは、ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの組合せから成り立っている。この2種類の成分エネルギーは常に組になって存在するもので、波浪エネルギーの中で、ポテンシャルエネ

ルギーだけとか運動エネルギーだけとか、どちらか一方だけを利用することは不可能である。

2.2 規則波の波浪パワー

規則波のもつ波浪パワーは、(4)式のように波高の2乗と周期との積で表わされる。いま、長波頂規則波中の波浪エネルギーを考えることにする。海洋波で規則波というと、一定周期で振動する進行波を指す。長波頂という仮定は、一次元波動を考えればよいということの意味する。砕波とか波高波長比が1/20を超える波を除くと、海洋波は線形理論でよく表現されることが知られている。規則波のもつ波浪エネルギーは、通常、一周期間あるいは一波長間で平均した値が用いられる。線形理論では進行波のもつエネルギー \bar{E}_{reg} はポテンシャルエネルギーと運動エネルギーに等分配される。進行波のエネルギーは群速度 V_g で伝播するので、単位時間当りの波浪エネルギーの移動量であるエネルギーフラックスの時間平均 $\dot{\bar{E}}_{reg}$ は、 $\bar{E}_{reg} \cdot V_g$ と表わされる。このエネルギーフラックスを、時間平均した波浪パワーと定義する。海洋波は分散性の媒質中の波動であるので、波周期(または波周波数)と波長の間にはある特別な分散性の関係がある。いま進行波の振幅を a 、周期を T 、円周波数を ω 、波長を λ とおくと、

$$\bar{E}_{reg} = \rho g a^2 / 2 \quad (1)$$

$$V_g = g / (2\omega) = \lambda / (2T) = gT / (4\pi) \quad (2)$$

$$\dot{\bar{E}}_{reg} = \bar{E}_{reg} \cdot V_g = \rho g^2 a^2 T / (8\pi) \quad (3)$$

ただし、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 $\bar{\quad}$ は1周期にわたる時間平均を意味し、 $\dot{\quad}$ は時間微分を表わす。波浪エネルギー、波浪パワーは、進行波の波長線に沿って単位幅をとったときの値とする。波高 H をメートルで、周期 T を秒で測ると

$$\dot{\bar{E}}_{reg} = 0.98 H^2 T \quad (\text{KW} / \text{m}) \quad (4)$$

となる。ここで $H = 2a$ 、 $\rho g = 1,025 \text{ kg} / \text{m}^3$ としてい

* 東京大学生産技術研究所 教授

〒106 東京都港区六本木7-22-1

る。

2.3 不規則波の波浪パワー

実際の海面で遭遇する海洋波は不規則波である。不規則波のもつ波浪パワーは、(7)式に示すように有義波高の2乗と平均波周期との積で表現できる。線形理論では短波頂不規則波は、あらゆる方向からやってくる無限個の素成波の和で表わすことができる。それぞれの素成波がもつパワーは(3)式で表わされる。波スペクトルの方向分布関数は、波の進行方向に対して $(-\pi/2)$ より $(\pi/2)$ の範囲にわたって $(\cos^2 \chi)$ 分布をしているものと仮定する。ただし χ は素成波の進行方向と波の平均進行方向とのなす角である。結局、短波頂不規則波の単位幅当りのパワー \bar{E}_{irr} は、

$$\bar{E}_{irr} = \frac{\rho g^2}{8\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} 2\pi \left[\sqrt{2S'(\omega, \chi)} d\omega d\chi \right]^2 \quad (5)$$

$$\text{ただし、 } S'(\omega, \chi) = (2/\pi) \cdot S'(\omega) \cdot \cos^2 \chi \quad (6)$$

ここに、 $S'(\omega)$ は不規則波の標準スペクトルとする。

いま有義波高 H_w と平均波周期 T_w をそれぞれメートルと秒で測ることにすると、ピアソン・モスコヴィツチ型の波スペクトルでは、

$$\bar{E}_{irr} = \alpha H_w^2 T_w \quad (\text{KW/m}) \quad (7)$$

となる。 α は標準スペクトルに対応した係数で、ISCスペクトルでは $\alpha = 0.54$ となり、JONSWAPスペクトルに対しては $\alpha = 0.57$ となる²⁾。(4)式の規則波の係数と比べると約半分以下になっていることがわかる。波スペクトルの形状が狭帯域になる程規則波に近づき、係数 α が大きくなる傾向にある。不規則波の方向分布の影響は、波浪発電装置の応答特性に含めて考えることができるので、入力としての波浪パワーではエネルギーの伝播方向は全て同等に扱っている。

さらに、波浪発電装置の設置海域における確率変数 H_w と T_w の結合確率密度関数 $p(H_w, T_w)$ が与えられると、その海域での波浪のもつ単位幅当りのパワーの期待値 $E[\bar{E}_{irr}]$ は次式から算定される。

$$E[\bar{E}_{irr}] = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{E}_{irr} \cdot p(H_w, T_w) dH_w dT_w \quad (8)$$

日本近海での波高 H_w と波周期 T_w の長期発現頻度を与える波浪統計資料を用いて⁴⁾、(8)式に従って波浪パワーの期待値を推定した結果を図-1に示す³⁾。図-1ではJONSWAPスペクトルを仮定している。

日本周辺での波浪パワーの期待値は、通年で平均13 KW/mが見込まれる。四季別では冬季の波浪パワーが一番大きい。日本の全周約5000kmにわたってこの波浪パ

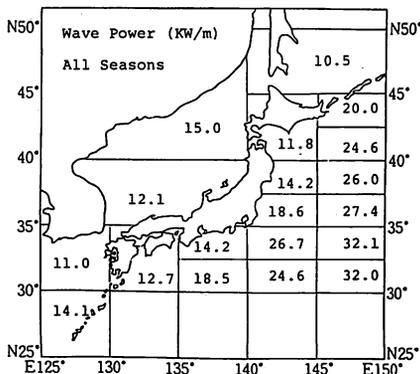


図-1 日本近海の波浪パワーの期待値³⁾

ワーを吸収するならば約 65×10^6 KWとなり、日本の電力の半分近くをまかなう量となる。

3. 波浪発電理論

3.1 波浪発電とは

波浪発電とは、波のもつエネルギーを利用して発電することを指す。波浪発電システムでは、波浪中に置かれた装置により、波浪エネルギーを可動物体の力学的エネルギーに変換し、その力学的エネルギーを利用して発電する仕組みになっている。

波浪発電理論は、波と装置ならびに可動物体との相互干渉を論ずるものである。発電機につながる負荷は、可動物体の運動における抵抗におきかえて考える。装置につながる可動物体とは、装置本体のこともあるし、空気タービン式装置（振動水柱装置ともいう）では空気室下面の振動する水柱を指すこともある。

規則波中で負荷抵抗のつながった可動物体の応答をどのように解析するか、吸収パワーをどのように推定するか、吸収パワーを最大にするための条件は何か、また不規則波中での吸収パワーの解析法などにつき以下に述べる。

3.2 規則波中のエネルギー吸収特性解析²⁾

可動物体は単一モードの運動を行うと仮定して、波浪発電装置の基本的な特性解析法を概説する。

3.2.1 運動方程式

規則波中の可動物体の運動は、通常の場合と同様にして求められる。運動 ξ を行う可動物体の運動方程式は

$$(M+m)\ddot{\xi} + (N+d')\dot{\xi} + (c+k+g')\xi = E_w \exp(i\omega t) \quad (9)$$

である。ここで、 M 、 c はそれぞれ可動物体の質量、復原力係数、 d' 、 k はそれぞれ負荷系の減衰係数、ば

ね常数, g' は係留系のばね常数である. m と N は可動物体の付加質量と造波減衰係数, $E_w \exp(i\omega t)$ は波強制力である. m , N および E_w は流体力で, ラプラス方程式を支配方程式とするラディエーション問題もしくはディフラクション問題を解くことにより理論的に求められる.

3.2.2. 吸収パワー

装置の可動物体によって, 単位時間当りに吸収される波浪エネルギーの一周期間の平均, すなわち平均吸収パワー \bar{E} は次式で求められる.

$$\bar{E} = (1/T) \int_0^T \text{Re}[F] \cdot \text{Re}[\dot{\xi}] dt \quad (10)$$

ここに, F は流体力を表わす. F および ξ は, 入射波に対する位相を含むため複素表示しており, $\text{Re}[\]$ は実部をとることを意味する. (10)式右辺の被積分関数は, 単位時間に流体力が可動物体になす仕事である.

流体力 F は(9)式より

$$F = E_w \exp(i\omega t) - m\ddot{\xi} - N\dot{\xi} \\ = M\ddot{\xi} + d'\dot{\xi} + (c+k+g')\xi \quad (11)$$

と表わされるから, いま可動物体の運動を $\xi = \ell \exp(i\omega t)$ として, (11)式を(10)式に代入すると

$$\bar{E} = \omega^2 \ell d' \ell^* / 2 \quad (12)$$

が得られる. ここで, E_w , ℓ は複素表示しており, 右上肩の $*$ は複素共役値をとることを意味する. 装置の可動物体の側でエネルギー吸収に関与するのは負荷減衰力だけである. 慣性力およびばねや静水圧による復原力は, 1周期運動する間に, エネルギーを貯えたりはきだしたりの働きはするが, 時間平均したエネルギー吸収には寄与しない.

運動方程式(9)式を解いて運動振幅 ℓ を求め, それを(12)式に代入すると,

$$\bar{E} = \frac{\omega^2 d' |E_w|^2}{2 \{ [(c+k+g') - \omega^2(M+m)]^2 + \omega^2(N+d')^2 \}} \quad (13)$$

を得る. 制御可能なパラメータを負荷特性 d' と k とすると, 吸収パワー \bar{E} を最大にする条件は $\partial \bar{E} / \partial d' = 0$, $\partial \bar{E} / \partial k = 0$ より

$$d' = N, \quad k = \omega^2(M+m) - c - g' \quad (14)$$

となることがわかる. つまり, 吸収パワーが最大となるのは, 可動物体の負荷の減衰係数は造波減衰係数に等しく, かつ, 負荷のばね常数は, その周波数で運動が同調するような値のときである. このとき運動振幅は, 負荷がない場合の同調時の運動振幅の半分である.

吸収パワーを特定の周波数だけでなく, どの周波数に対しても最大とするためには, 常に(14)式が成り立つように制御する必要がある.

3.2.3 エネルギー吸収係数

平均吸収パワーは, 通常, (3)式の入射波のもつパワー \dot{E}_{reg} によって無次元化される. 基準幅を B_0 とすると,

$$\eta = \bar{E} / (\bar{E}_{reg} \cdot B_0) \quad (15)$$

である. B_0 として波頂線に沿った装置の幅を選ぶと, 2次元問題の場合, η は高々1であるから η をエネルギー吸収効率と呼ぶことができる. しかし3次元問題では, η は容易に1を超えうるので効率と呼ぶことはできない. したがって一般的には η をエネルギー吸収係数という. 3次元問題で η が1を超える理由は, 装置への入力エネルギーとしては無限大の幅の入射波が関与しているにも拘らず, いまの場合は装置の幅分の入射波しか考慮していないからである. 「海明」のように細長い装置の場合, η が1を大幅に超えることがある. そのようなときには, η を1前後の値に収めるため, B_0 として装置の長さをとることがある.

各周波数に対する最大エネルギー吸収係数 $\max. \eta$ は, (14)式を(13)式に代入して得られる吸収パワーを(15)式に代入すると求められる. その際, ハスキントの関係を用いると,

$$\max. \eta = \frac{|H(\beta)|^2}{|H(\beta+\pi)|^2 + |H(\beta)|^2} \quad (2 \text{次元問題}) \quad (16)$$

$$\max. \eta = \frac{\lambda}{B_0} \cdot \frac{|H(\beta)|^2}{\int_{-\pi}^{\pi} |H(\theta)|^2 d\theta} \quad (3 \text{次元問題}) \quad (17)$$

となり, 最大エネルギー吸収係数はコチン関数 $H(\theta)$ で表わされる. コチン関数とは, 静水面で可動物体を強制動揺させたとき, 基準座標軸からみて θ 方向に発散する発散波の無限遠方での振幅に対応する関数である.

回転運動を利用した2次元形状の装置のエネルギー吸収係数を図-2に示す.³⁾ 図の横軸は無次元化した周波数 ($K = \omega^2/g = 2\pi/\lambda$, R_0 : 装置の代表長さ) である. エネルギー吸収係数が1になる場合があり, またエネルギー吸収係数の高い周波数領域が広く, 優れたエネルギー吸収特性を有している.

3.3 不規則波中のエネルギー吸収特性解析

3.3.1 吸収パワースペクトル^{3,5)}

変動する吸収パワー \bar{E} は(10)式の被積分関数で表わされる. いま装置の負荷系の減衰係数がばね常数に比べ

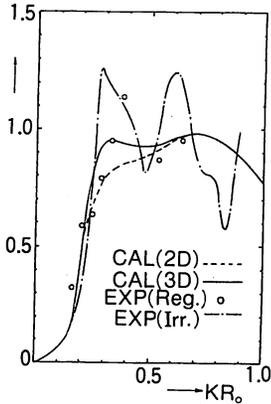


図-2 エネルギー吸収係数³⁾

て卓越しているとするならば、

$$\dot{E} = d' \dot{\xi}^2 \tag{18}$$

となる。不規則波中では、運動 ξ が確率過程であるので、吸収パワー \dot{E} も確率過程となる。 ξ は零平均定常正規過程と考えられるので、吸収パワースペクトル $S_{\dot{E}}(\omega)$ は次式で与えられる。

$$S_{\dot{E}}(\omega) = \{d' R_{\dot{\xi}}(\tau)\}^2 \delta(\omega) + 2d'^2 \int_{-\infty}^{\infty} S_{\dot{\xi}}(\nu) S_{\dot{\xi}}(\omega - \nu) d\nu \tag{19}$$

ただし、 $R_{\dot{\xi}}(\tau)$ は $\dot{\xi}$ の自己相関関数、 $\delta(\omega)$ はディラックのデルタ関数、 $S_{\dot{\xi}}(\omega)$ は運動速度 $\dot{\xi}$ のスペクトルである。右辺第1項は吸収パワースペクトルの定常分、第2項は変動分である。電力として使えるのは定常分であるが、変動分も電力の質を知る上で重要である。

平均吸収パワー $\overline{\dot{E}}$ の応答関係を

$$H_{\eta w}(\omega) = \overline{\dot{E}} / a^2 \tag{20}$$

と定義し、海洋波のスペクトルを $S'(\omega)$ とすると、平均吸収パワーのスペクトル $S_{\eta}(\omega)$ は

$$S_{\eta}(\omega) = H_{\eta w}(\omega) \cdot S'(\omega) \tag{21}$$

と表される。これと吸収パワースペクトルの定常分の間には、

$$d' R_{\dot{\xi}}(\tau) = d' \sigma_{\dot{\xi}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} d' \omega^2 S_{\dot{\xi}}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\eta}(\omega) d\omega \tag{22}$$

の関係がある。ただし、 $\sigma_{\dot{\xi}}^2$ は運動速度 $\dot{\xi}$ の分散、 $S_{\dot{\xi}}(\omega)$ は運動 $\dot{\xi}$ のスペクトルである。

次に吸収パワーの確率密度関数を求める。負荷系からの反力 T' は、(11)式右辺第2式の第2項で表わされるとし

$$T' = d^1 \dot{\xi} \tag{23}$$

とおく。反力 T' の分散 $\sigma_{T'}^2$ は、

$$\sigma_{T'}^2 = d'^2 R_{\dot{\xi}}(\tau) \tag{24}$$

となる。いま吸収パワー \dot{E} を、 $\hat{E} = \dot{E} / (\sigma_T \sigma_{\dot{\xi}})$ のように無次元化すると、(18)式で与えられる吸収パワーの確率密度関数 $f_{\hat{E}}(\hat{E})$ は、自由度1の x^2 分布となり

$$f_{\hat{E}}(\hat{E}) = \exp[-\hat{E}/2] / \sqrt{2\pi \hat{E}} \tag{25}$$

である。吸収パワーの期待値 $\overline{\dot{E}}$ は、

$$\overline{\dot{E}} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{E} f_{\hat{E}}(\hat{E}) d\hat{E} = d' \sigma_{\dot{\xi}}^2 \tag{26}$$

となる。これは(25)式からわかるように吸収パワースペクトルの定常分に対応している。

3.3.2 長期にわたる吸収パワーの期待値³⁾

ここまでの結果と、波浪の長期発現頻度の資料から、長期にわたる吸収パワーの期待値を推算することができる。不規則波がもつ単位幅当りの平均パワー $\overline{\dot{E}}_{irr}$ は(7)式で与えられる。装置により吸収される単位幅当りのパワー \dot{E} は、(8)式から求め、不規則波中のエネルギー吸収係数 η_{irr} は、

$$\eta_{irr} = \overline{\dot{E}} / \overline{\dot{E}}_{irr} \tag{27}$$

で与えられる。いろいろな T_w に対して η_{irr} が既知であるならば、単位幅当りの、長期にわたる吸収パワーの期待値 $E[\overline{\dot{E}}]$ は、次式から求まる。

$$E[\overline{\dot{E}}] = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \alpha H_w^2 T_w \cdot \eta_{irr}(T_w) \cdot p(H_w, T_w) dH_w dT_w \tag{28}$$

ここで、 $p(H_w, T_w)$ は設置海域での確率変数 H_w と T_w の結合確率密度関数とする。

3.3.3 解析例

回転運動を利用した装置に対する解析例を示す。図-3は不規則波中での吸収パワーのタイムヒストリーである。⁵⁾ 吸収パワーは平均値のまわりにゆっくり変動する成分と、入射波のピーク周波数の約2倍の周波

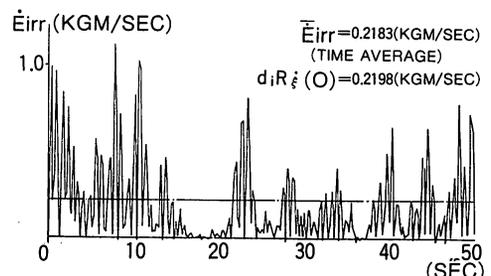


図-3 吸収パワーのタイムヒストリー⁵⁾

数で変動する成分があることがわかる。図-4には(19)式右辺第2項で表わされる吸収パワースペクトルの変動分を示す。⁵⁾

ところで、一般に発電機の発電能力には限界があり、吸収パワーの変動分がある限界を超えると発電機を停止しなければならない。したがって、吸収パワーの変動分が大きすぎることは、装置のエネルギー吸収特性の低下につながる。装置から得られる電力の質と、装置の経済性の向上をはかるためには、吸収パワーの変動分を平滑化することが不可欠である。波浪エネルギー2次変換装置が油圧装置である場合、平滑化の1つの方法として、アキュムレーターを使用する方法が有効である。

図-5は、(7)式で定義される不規則波中のエネルギー吸収係数である。³⁾ また図-6は、このエネルギー吸収係数と日本近海の波浪統計資料⁴⁾を用いて、(8)式により推算した、単位幅当りの吸収パワーの期待値である。標準スペクトルとしてJONSWAPを使用している。この図から日本周辺での吸収パワーの期待値の平均を

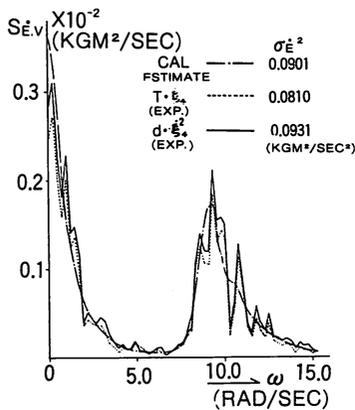


図-4 変動吸収パワーのスペクトル⁵⁾

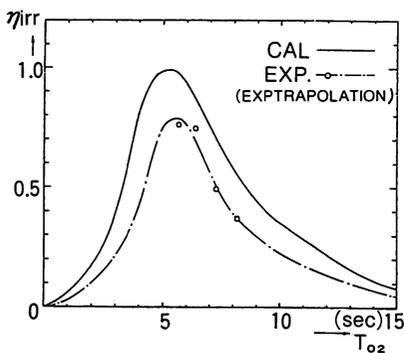


図-5 不規則波中のエネルギー吸収係数³⁾

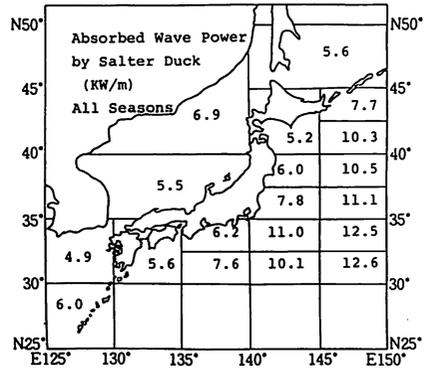


図-6 日本近海での吸収パワーの期待値³⁾

求めると、不規則波のもつパワーは約13KW/mであるのに対して、装置による吸収パワーは約13KW/mで、効率約50%となっている。この数値が、波浪エネルギー1次変換装置の性能の目安である。このあとに空気タービン、油圧モータなどのエネルギー2次変換装置がつながり発電機を廻す。エネルギー2次変換装置以降の機器の効率が加わって、最終的に波浪発電装置の効率が定まる。

4. あとがき

不規則な海洋波のもつ波浪エネルギーの推定法、ならびに、不規則波中での波浪発電装置のエネルギー吸収特性の解析法の基本的事項を解説した。

線形理論の範囲内では、波浪発電に関する基本的理論は既に確立されたものといえる。しかも、波浪発電装置の基本設計では線形理論が十分有用である。今後の課題は、理論を応用することであり、波浪発電装置の設計法を確立することである。

参考文献

- 1) 前田久明, 木下 健; 波浪発電, 生産研究 31巻 11号 (1979)
- 2) Maeda, H., Tanaka, H. and Kinoshita, T., Theoretical and Experimental Study on Wave Power Absorption, 13th Symp. Naval Hydrodynamics, (1980)
- 3) 前田久明, 木下 健, 加藤俊司; 波浪発電装置に関する基礎的研究(その2), 日本造船学会論文集 149号 (1981)
- 4) 日本造船研究協会第163研究部会; 気象海象および船舶の波浪中応答に関する統計的解析ならびに実船計測, 日本造船研究協会研究資料 No.277 (1977)
- 5) Maeda, H., Kinoshita, T., Kato, S. and Suzuki, F.; Fundamental Research on Absorbing Energy from Ocean Waves, (3rd Report), J. of Soc. Naval Arch. of Japan Vol.150 (1981)