

II-12 防波施設に組み込む固定式波力発電装置の研究 (3)

ーテストプラントによる実験ー

室蘭工業大学 正会員○谷野賢二
 室蘭工業大学 正会員 近藤俊郎
 室蘭工業大学 渡部富治
 室蘭工業大学 松田敏彦

1. ま え が き

我国における波力エネルギーもしくは波力発電装置の研究は活発化の兆しが見られるようになってきた。従来、この種の研究は理論解析ないしは室内実験による基礎的な研究が主であったが、最近では、実際の不規則な波による波力エネルギーシステムの検討が始められている^{1),2)}。

筆者らもサボニウス・ローターを用いた沿岸固定式の波力エネルギー吸収装置について数年前から研究を進め、基礎的な成果^{3),4)}が得られており、現在、室蘭港南外防波堤沖側に小規模なテストプラントを設置し、システムの特性を検討している。このような海上実験では、入力が不規則なため平均出力と最大出力の差が大きく、変換装置の適正規模や最適負荷の設定がむずかしい。さらに、不規則波に対する装置の運動や出力の解析は、浮体の運動からエネルギーを取り出す場合のように、外力に対する装置の運動を比較的容易に見積ることができるものに限られている。エネルギーの1次変換をサボニウス・ローターなどの水車でおこなう場合、外力によって水車の発生するトルクは水車速度の関数であり、外力(波)は時間の関数となる。このため、システムの運動方程式中にはこの両者の積である非線形項が存在することになり、解析的な解は得られない。

本論文では、テストプラントによるエネルギー変換について、外力を波高のみの関数として単純化したモデルを設定し、不規則波に対する装置の出力予測をおこなうとともに、海上実験の結果について示すものである。

2. エネルギー変換装置の概要

波エネルギーはサボニウス・ローターによって機械エネルギー(トルク×回転速度)に変換され、図-1に示めされる歯車、プーリーを含む伝導軸を経て、発電機を駆動する。発電機として、近似的に回転数に比例するトルクが得られる他励発電機(定格:1500rpm、2.2kW)を用いた。発電機の負荷には、各ノッチ均等可変式負荷抵抗器(直流用3kW、100V、30A、30ノッチ)を使用し、外力に応じて負荷の設定ができる。

出力の計測には、図-1中⑦、⑧にそれぞれトルク計、回転計を取り付けてトルク、回転数を検出するとともに、発電機の発生電圧、電流を測定した。

3. 不規則波にに対する出力予測

3-1 水車出力に及ぼす負荷特性の影響

図-2は横軸に水車の角速度、縦軸に水車の工率と出力トルク及び速度に比例した負荷トルクをとり各々の関係を模式的に描いたものである。水車に作用する外力が一定の場合、負荷特性Iでは波高 H_1 で水車トルクとA点で交わり、これが波高 H_1 における水車の作動点(定常回転位置)となる。同様に、各々の波高に対する出力トルク-速度

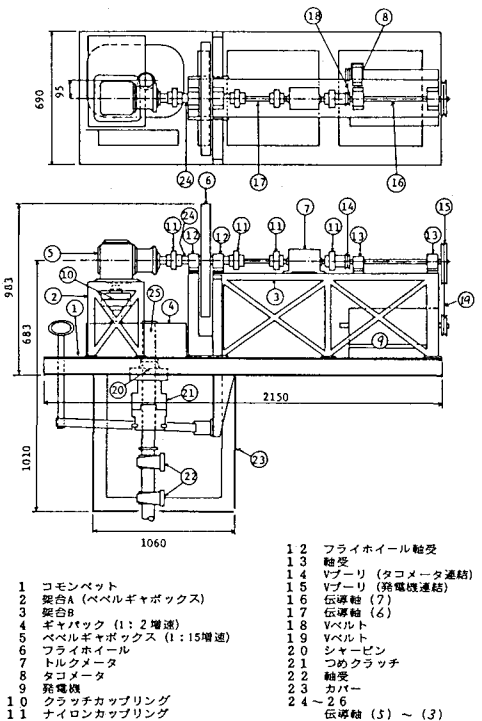


図-1 変換装置

特性と負荷トルク-速度特性の交点が対応する作動点となる。図から明らかなように、負荷特性Ⅰでは波高 H_1 のとき作動点 A は工率の最大点となるが、波高 H_2 では作動点は A' となり最大工率からはずれることになる。負荷特性Ⅱでは逆に波高 H_2 で最大工率が得られ、 H_1 では出力は低下する。

海上では種々の波高が出現するので、負荷特性の適切な設定が必要となる。

3-2 波高に対する発電出力応答

発電システムの運動方程式は次式によって表わされると考える。ただし、この式では一方向クラッチ及び機械的な損失は考えない。

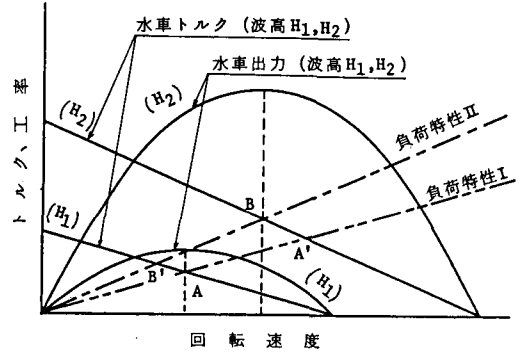


図-2 水車出力に及ぼす負荷特性の影響

$$I^* \frac{d\omega}{dt} = T_w^* (1 - \frac{\omega}{\omega_0^*}) - N_g \omega - N_w^* \omega \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 I^* ：慣性モーメント、 T_w ：水車トルク、 N_g ：発電機の負荷トルク係数、 N_w ：水車の造波抵抗係数、 ω ：発電機の角速度、 ω_0^* ：無負荷時の水車角速度 であり * 印は各々の値の発電機軸上への換算を意味し、以下の誘導でも用いられる。水車に作用する波力 F は、

$$F = \rho C_D R_0 h u^2 / 2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

である。ここに、 ρ ：水の密度、 C_D ：抗力係数、 R_0 ：水車半径、 h ：水深、 u ：水平粒子速度である。本システムは重複波の節における水平粒子速度を利用するものであり⁵⁾、 u として水深方向に平均した重複波の水粒子速度、

$$u = HL \sin kl \sin \sigma t / hT \quad \dots \dots \dots (3)$$

を用いると、水車トルクは次式のようになる。

$$T_w = \frac{1}{2} \rho C_t R_0^2 h \left(\frac{HL}{hT} \right)^2 \sin^2 kl \sin^2 \sigma t \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 C_t ：水車のトルク係数、 $T \cdot H \cdot L$ ：水室内の波の周期・波高・波長、 l ：波の反射面と水車中心間距離、 k ：波数、 σ ：波の角周波数 である。(4) 式を(1)式に代入すると(1)式の右辺第1項は非線形項となり、解析的に解けない。波高の変化に対応する出力変化に主眼を置いて、(4)式の時間変動を平均化してトルク係数 C_t に含むと、(1)式は次のように解ける。

$$\begin{aligned} \omega &= \bar{\omega} - \bar{\omega} e^{-pt} \quad \dots \dots \dots (5) \\ \left[\begin{aligned} \bar{\omega} &= \frac{\tau^* H^2}{N_g + N_w^* + \frac{\tau^* H^2}{\omega_0^*}}, & p &= (N_g + \frac{\tau^* H^2}{\omega_0^*} + N_w^*) / I \\ \tau &= \frac{1}{2hT^2} \rho C_t R_0^2 L^2 \sin^2 kl \end{aligned} \right] \end{aligned}$$

ω_0 を水車の翼先端速度と時間最大流速の比として定義される周速比 α で表わすと次式になる。

$$\omega_0 = \alpha u_{max} / R_0 = \alpha \beta H \quad : \beta = L \sin kl / R_0 hT \quad \dots \dots \dots (6)$$

(6) 式を(5)式に代入すると、(5)式は周期が決まると波高だけの関数となる。(5)式の定常項は図-2 にしめされる作動点の角速度にあたる。したがって、発電機効率を η とし、定常回転における発電出力を $W_g(H)$ とすると、 $W_g(H)$ は次式になる。

$$W_g(H) = \eta N_g \bar{\omega}^2 = \eta N_g \frac{(\tau^*)^2 H^4}{(N_g + N_w^* + \frac{\tau^* H^2}{\alpha \beta H})^2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

不規則波に対しては木村ら⁶⁾が、波高の確率分布がレーリー分布をずらすとして、海中構造物の変位の確率分布を求めており、ここでも同様な方法で出力傾向を検討する。売電システムが不規則波の個々の波高に対して(7)式で示される出力特性をもつとする。波高の確率分布がレーリー分布で与えられる場合、各波高に対する出力の確率密度関数は次式となる。ただし、水室内波高の分布特性は入射波の特性に等しいとする。

$$p(H) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}} \right)^2 \right] \quad \bar{H} : \text{平均波高} \quad \dots \dots \dots (8)$$

出力の確率分布は次の手順で求める。波高の上限 H_{max} を定め、適当な区間幅 ΔH で波高を m 個(= $H_{max}/\Delta H$)のランクに区分する。各ランクの波高をその中央値で代表させて(7)、(8)式に代入する。得られた出力を再度適当なランクに区分し、それぞれのランクごとに対応する出現確率を求めれば出力の確率特性が得られる。水室内波高が入射波に対して歪んでいる場合には、(7)式の H として各々の H に対応する修正波高 $\tilde{H}$ を用いればよい。波高の上限については $4\bar{H}$ 程度でよい。

平均出力 $\overline{W_g(H)}$ は次式で表わされる。

$$\overline{W_g(H)} = \sum_{n=1}^m \overline{W_g} \left(\frac{[2n-1]n}{2} \cdot \Delta H \right) \cdot p \left(\frac{[2n-1]n}{2} \cdot \Delta H \right) \cdot \Delta H \quad \dots \dots \dots (9)$$

平均値を最大にする負荷特性は(9)式を N_g で微分して、

$$\frac{\partial \overline{W_g(H)}}{\partial N_g} = 0 \quad \dots \dots \dots (10)$$

を満足する N_g を求めればよい。

4. 海上実験

本実験では、入力となるテストプラント付近の波浪観測は行なわれていない。入力の推定はプラントから約2km沖、水深-23mに設置された北海道開発局の超音波式波高計による観測資料に基づいて行なった。

図-3は発電出力の例である。図に見られる短周期の小さな振動はおよそ入射波の1/2周期となっている。このことは、1/2周期ごとに変化する重複波の往復流を利用した本システムの特徴をよく表わしている。30~50秒の大きな変動は、高波の連なり (wave group) の出現間隔に関連して現われていると考えられる。

図-4は10分間の発電出力記録と(7)、(8)式から求めた予想出力の未超過確率を示している。

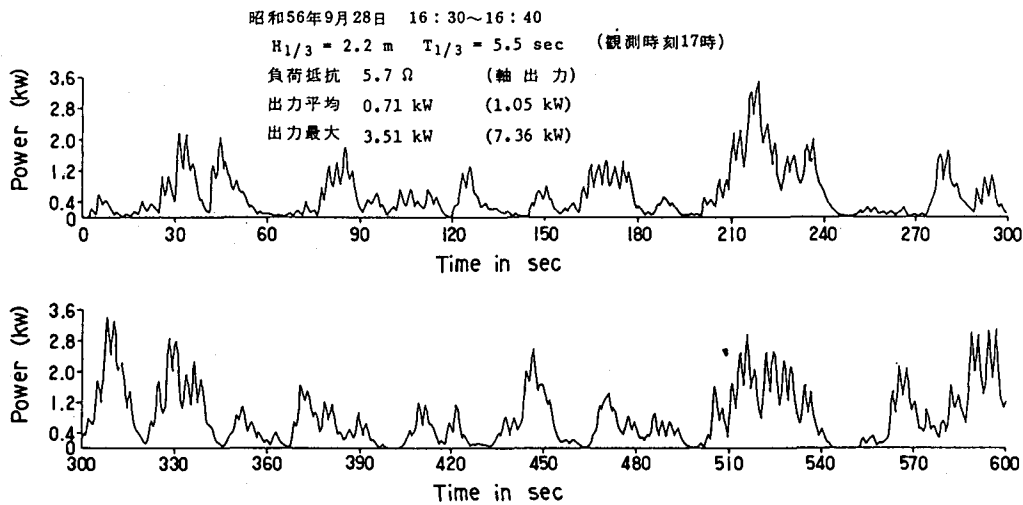


図-3 発電出力

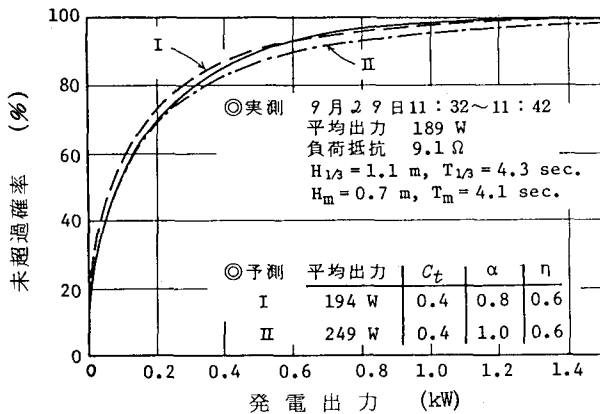


図-4 出力の未超過確率

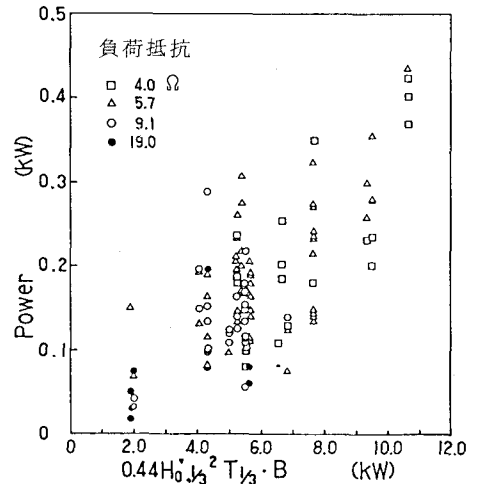


図-5 平均出力の分布

推定式は比較的よく現象を表わしているが、波高が増加するにつれて出力を過大に評価する傾向にある。また、実際には発電機効率は一定ではなく、定格出力の約1/2で最大となり、その前後で低下する。したがって、それに対する考慮が必要であろう。

これまでの観測結果について、10分間ごとの発電出力平均値と沖波の資料から推定した平均入力 ($0.44H_0'^{1/3^2} T_{1/3} \cdot B$, B : 水室幅員) の関係を図-5に示す。図から求まるエネルギーの平均取得率はおよそ4%程度に留まり、満足する結果とはなっていない。

5. あとがき

本研究では、波力発電テストプラントの出力の簡単な予測を行ない、また、海上実験によってその特性を検討した。不規則波に対する本システムの出力傾向は(7)、(8)式で近似しうることが分かったが、実際の個々の入射波と出力の相関については、水車付近での波高記録がないため、その特性を把握するには至らず、今後の課題となった。また、本システムの性能を向上させるためには、外力に対するシステムの運動特性について、波の波高変化だけでなく周期的変動にも注目する必要があるだろう。

最後に、実験データの取得と解析には室蘭工業大学土木工学科4年生小玉茂義、平沢 誠、村田哲哉、水野敏雄があたった。また、北海道開発局室蘭港湾建設事務所の各位には波浪資料等につきご支援いただいた。ここに記して深く感謝する。

参考文献

- 1) 宮崎武晃・益田善雄 長崎作治：波力発電装置「海明」の研究開発(3)ー海上実験と水槽実験間の関係と解析ー、第28回海講論文集、pp. 589~593、1981。
- 2) 田中裕久・川村敏雄：非対象形状浮体を用いた波力吸収装置の特性(第5報、Gー/T 波力吸収装置の海上性能試験)、日本機械学会講演論文集No. 810-9、pp. 5~8、1981。
- 3) 谷野賢二・近藤俊郎：防波施設に組み込む固定式波力発電装置の研究(2)ー波力水車方式ー、土木学会北海道支部論文報告集、第36号、pp. 125~130、1980。
- 4) 近藤俊郎・谷野賢二・高橋幹夫・渡部富治・奥田教海：防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究ー波力水車方式ー、第28回海講論文集、pp. 381~385、1981。
- 5) 前出3)
- 6) 木村 晃・瀬山 明・浜島幹雄：不規則波による海中構造物の変位の確率特性、第28回海講論文集、pp. 401~405、1981。