

防波施設に併設する波浪エネルギー吸収装置の研究(2)

—振り子式—

渡部 富治* · 近藤 俊郎** · 谷野 賢二***
竹田 英章**** · 黒井 昌明*****

1. まえがき

波エネルギー利用システムについては従来より種々の方式が研究されており、近年に提案された主な方式は表-1のように分類される。これらのうち、防波堤などの沿岸施設に併設する波エネルギー吸収システムについて、

筆者らは数年前から研究を進めてきた²⁾。前報¹⁾では、その一方式として波力水車式について、エネルギー変換特性と防波堤としての機能および安定性を検討した。この方式は、基本的には水室内の定常波動を利用し、その節の付近に生ずる交番性の水平水粒子運動のエネルギーを、鉛直軸周りに一方向に回転するサボニウス

表-1 主要波力発電方式の種類¹⁾

設置方法	力学特性	物体あるいは水粒子の運動方向	名称 (国)	
浮遊式	受働型 (点型)	水圧式	Tornkvist (フィンランド)	空気タービン
		打上げ式	環礁ダム (米)	
		水圧式	空気袋 (英), CLAM (英)	
	共鳴型	上下動式	ブイ式 … 益田式 (日), Belfast (英)	油圧ポンプ
			直角式 … 海明 (日)	
			平行式 … OWC (英)	
			模型 (英, 日)	
固定式	受働型 (進行波型)	回転運動式	あひる (英), 連結いかだ (英)	油圧ポンプ
		水中運動式	振動水平円柱 (英)	
	共鳴型 (定常波型)	水圧式	水底波圧式	油圧ポンプ
			水平波圧式	
		流込式	HRS 整流装置 (英)	
		越波式	波流式 (日)	
		上下動式	NEL-OWC (英), 海産研・共振型 (日)	
	共鳴型 (定常波型)	水平動式	水車式 (日)	油圧ポンプ
			振り子式 (日)	

水車によって取り出す型式である。

本論文は、波力水車に代って、水平軸周りに揺動する振り子板を置いて、その運動エネルギーを油圧装置を介して取り出す方式を対象としている。この型式について理論的検討および水理実験を行なってその性能を調べるものである。また、北海道の日本海岸にある増毛町の振り子式発電プラント (昭和56年11月完成) において実施した現地試験の結果について報告する。

2. 基本的な特徴

本システムは、図-1に示すような、通常の防波堤用 R. C. ケーソンの海側の側壁を取り払い、それに代って

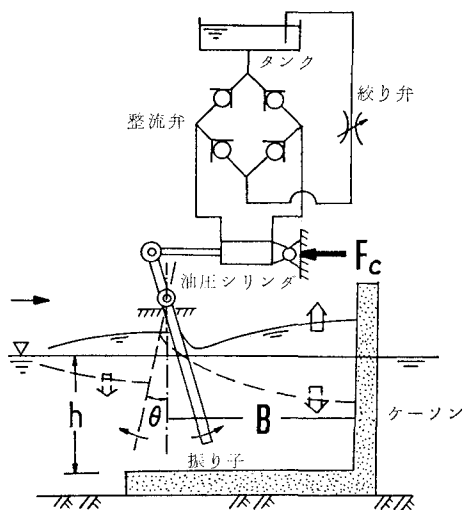


図-1 システム概念図

* 工博 室蘭工業大学教授 工学部2部機械工学科
** 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工修 室蘭工業大学助手 工学部土木工学科
**** 正会員 北海道開発局土木試験所港湾研究室長
***** 工修 日立造船技術研究所流体研究室

振り子板を置いた構造である。井島ら⁴⁾によると、矩形断面をもつ浮体の自由運動では、鉛直壁による反射を考慮した場合、運動のピークは浮体重心と岸壁との距離が入射波の波長の $n/4$ 倍にあるとき起こるとしている。このシステムは水室内の定常波動を利用しているので、それと同様の効果を期待でき、定常波の節の位置に振り子板があるときにはエネルギー吸収効率が高くなると推定される。また、回転軸をはじめとする変換部を水上に置くことができるので、保守、管理が容易に行なえる。

防波施設としての機能を考えると、これは可動部を有する直立堤とみることができ、エネルギー吸収があれば、波力や反射率は小さくなる。したがって、防波施設に併設されるならば、周辺の家象環境をほとんど変化させることなく、波浪エネルギーを利用できる。

3. 振り子システムの理論解析⁵⁾

図-2 に示されるような、半無限一定水深の流体中の一端で P 点周りに振動する振り子板を考える。振り子

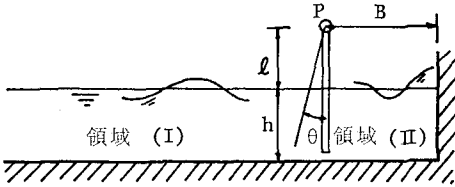


図-2 解析モデル

板の角速度 $\dot{\theta}$ に比例した荷特性 N を仮定すると、振り子板の運動方程式は次式で表わせる。

$$(I + I_1 + I_2)\ddot{\theta} + (N + N_1 + N_2)\dot{\theta} + K\theta = M_a \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 I : 振り子板の慣性モーメント、 K : 復元モーメント係数、 M_a : 波浪強制モーメントの振幅、 θ : 振り子板の揺動角、 ω : 角周波数、 I_i , N_i は次式で定義される radiation 流体力 (モーメント) の係数である。

$$M_i = -I_i \ddot{\theta} - N_i \dot{\theta}, \quad i=1, 2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

添数字 1, 2 はそれぞれ領域 (I), 領域 (II) の流体に対応する。

(1) 式の定常解は次のようになる。

$$\theta = \frac{M_a}{\sqrt{I^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (N_{1,2} + N)^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \alpha) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\alpha = \tan^{-1}\{(N_{1,2} + N)\omega / I(\omega_0^2 - \omega^2)\}$, $I' = I + I_1 + I_2$, $N_{1,2} = N_1 + N_2$, $\omega_0^2 = K/I'$ である。

負荷によって吸収される工率 p は、

$$p = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} N(\dot{\theta}) dt = \frac{1}{2} \frac{N\omega^2 M_a^2}{I^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (N_{1,2} + N)^2 \omega^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、入射波の波形が

$$\eta_i = a \sin(k_0 x + \omega t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられると、対応する波強制モーメントの振幅 M_a は

$$M_a = -\frac{2\rho a \omega^2}{k_0^3 \sinh k_0 h} (k_0 l \sinh k_0 h + \cosh k_0 h - 1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 a : 入射波の振幅、 l : 揺動中心から水面までの距離、 h : 水深、 ρ : 流体の密度、 k_0 は分散関係式 $k_0 \tanh k_0 h = \omega^2/g$ (g : 重力加速度) を満足する波数である。

一方、入射波の工率 p_w は、

$$p_w = \frac{\rho \omega^3 (\sinh k_0 h \cosh k_0 h + k_0 h) a^2}{4k_0^3 \sinh^2 k_0 h} \quad \dots\dots\dots (7)$$

したがって、波エネルギーの吸収効率 η は、

$$\eta = \frac{p}{p_w} = \frac{N}{I^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (N_{1,2} + N)^2 \omega^2} \frac{8\rho \omega^3 A_0^2}{k_0^4 B_0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= k_0 l \sinh k_0 h + \cosh k_0 h - 1 \\ B_0 &= \sinh k_0 h \cosh k_0 h + k_0 h \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。

また、 (I_1, N_1) , (I_2, N_2) は、領域 (I), 領域 (II) について、それぞれ発散波の速度ポテンシャルを求め、定義式 (2) を用いて解くと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\rho A_n^2}{k_n^4 B_n}, \quad N_1 = \frac{2\rho \omega^2 A_0^2}{k_0^4 B_0} \\ I_2 &= \frac{-2\rho A_0^2}{k_0^4 B_0 \tan k_0 B} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\rho A_n^2}{k_n^4 B_n \tanh k_n B}, \\ N_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 B : 振り子板の回転中心から後壁までの距離、

$$\left. \begin{aligned} A_n &= k_n l \sin k_n h - \cos k_n h + 1 \\ B_n &= \sin k_n h \cos k_n h + k_n h \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 k_n は $k_n \tanh k_n h = -\omega^2/g$, ($n=1, 2, 3, \dots$) を満足する固有値である。

波エネルギーの吸収効率の最大値 $\eta_{\max}$ は、 $(\omega_0^2 - \omega^2) = 0$, かつ、 $N_{1,2} = N$ のとき得られる。このとき、(8), (10) 式より、 $\eta_{\max} = 1$ となり、入射波のエネルギーは 100% 吸収される。

4. 水槽実験

(1) 実験方法

実験には長さ 18.5m, 幅 0.4m, 高さ 1.0m の片面ガラス張りの二次元造波水路を用いた。実験模型は室蘭港南外防波堤沖側に設置された海上実験用プラント⁶⁾規模の 1/10 モデルを想定して製作されている。振り子板には油圧シリンダが取り付けられており、前出 図-1 の回路により熱エネルギーに変換する。負荷は絞り弁によ

て調整される。

実験は周期 $T=1.0\sim 1.7$ sec, 入射波高 6 cm, 水深 35 cm の規則波を作用させて行なった。また、振り子板から後壁までの距離 B を 50 cm $\sim$ 80 cm まで変化させた。これらの条件で、振り子板の揺れ角 θ と油圧シリンダの反力 F_0 を測定して取得エネルギーを計算した。シリンダ反力 F_0 は、

$$F_0 = F_0 + \beta(r_0\theta)^2 \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 F_0 : シリンダの摩擦力, r_0 : 振り子板の揺動中心からシリンダ中心までの距離, β : オリフィス絞りによる負荷係数である。これより取得工率は次のようになる。

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T F_0 r_0 \dot{\theta} dt \quad \dots\dots\dots(13)$$

今回の実験の装置条件は、 $F_0=1.0$ kgf, $\beta=0.5\sim 5.0$ kgf $\cdot$ sec 2 /cm 2 である。

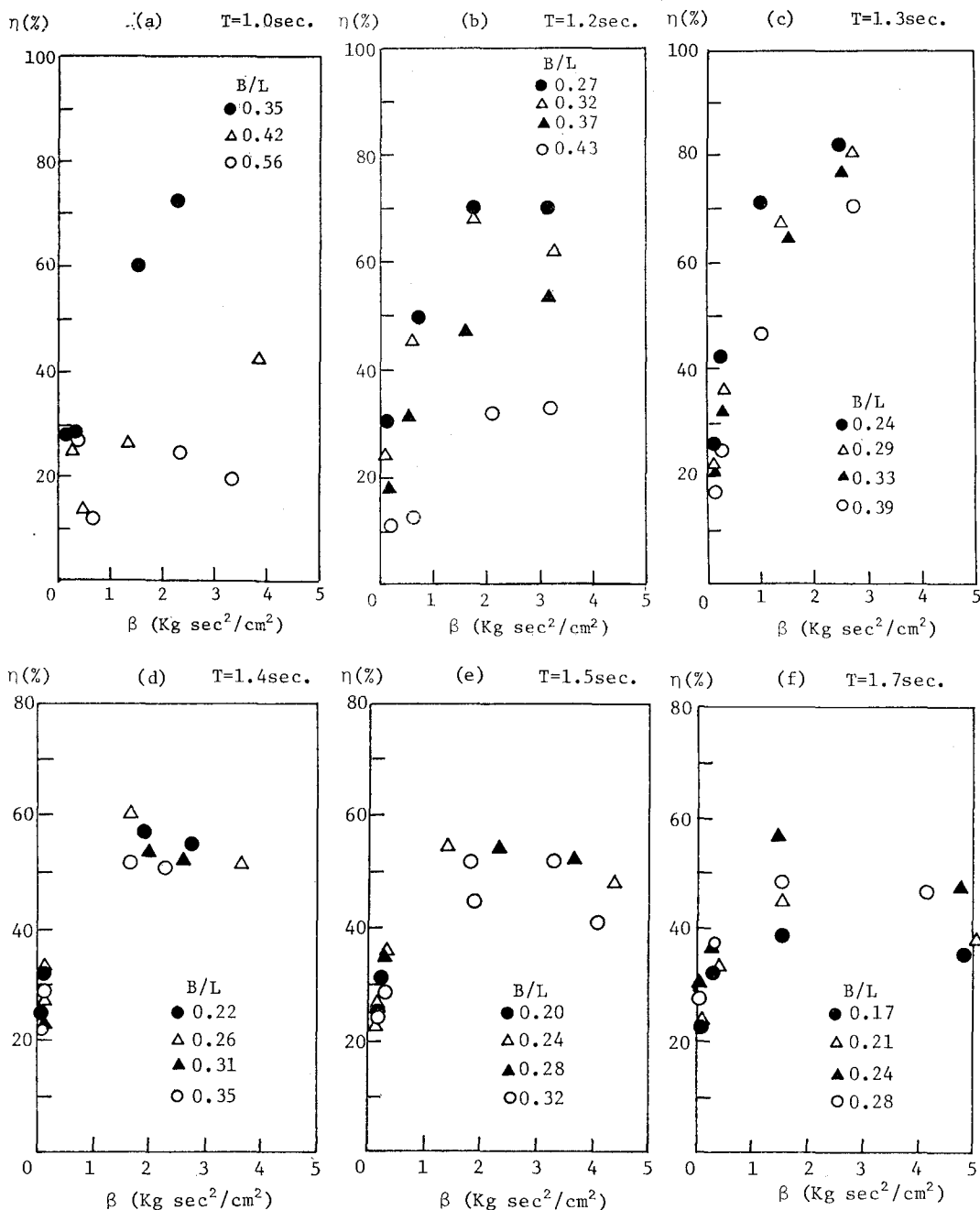


図-3 効率特性

(2) 実験結果

図-3 は負荷係数 β の変化に対する効率の変化を示したものである。パラメータには振り子板と後壁間の距離の比 B/L をとっている。 B/L に注目すると、各周期とも、 B/L が 0.25 に近いほど効率は高い値を示しており、 $B/L \rightarrow 0$ あるいは $B/L \rightarrow 0.5$ にいくにしたがって順次低下している。 $T=1.0$ では、 $B=0.7$ ($B/L=0.49$) のとき、ほとんど振り子は振動していない。このことは、 $B/L=0.25$ 、すなわち、定常波の節の位置に振り子があるとき、もっともエネルギー吸収が良く、 $B/L=0.5$ 、すなわち、定常波の腹の位置と振り子のそれが一致するとき、効率が低下することを示している。周期別にみると、効率の最大値は $T=1.3$ sec, $B/L=0.24$ のときに生じ、その値は $\eta=82\%$ である。また、 $T=1.3$ sec の前後では、効率の最大値は $T=1.3$ sec のそれより低い。各周期ごとの B/L の変化に対する効率の変化の傾向は、短周期側は長周期側に比較して同程度の B/L でも高い値を示している。

本実験の負荷特性は (12) 式のように非線形であり、そのままでは、理論との比較ができない。そこで、(13) 式と同じ仕事をする線形負荷として、 $F_N = N\theta$ を考えると、

$$N = \frac{8x_0}{T} \left\{ \frac{F_0}{((2\pi/T)x_0)^2} + \frac{2}{3}\beta \right\} l_0^3 \quad \dots\dots\dots (14)$$

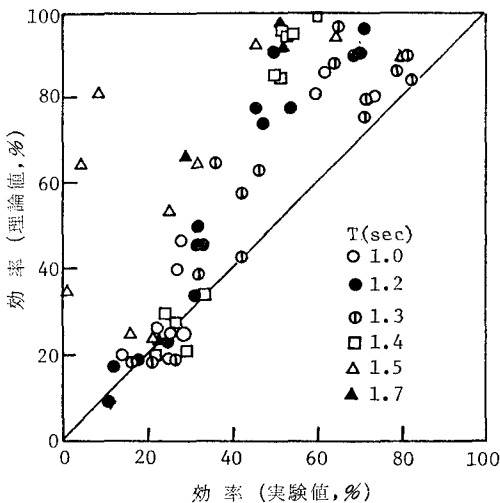


図-4 実験値と理論値の比較

となる。ここに、 x_0 : シリンダ変位の振幅、 l_0 : 回転中心からシリンダ中心までの距離である。(14) 式の N を (8) 式に代入して理論値を比較したのが 図-4 である。理論値は全体に実験値より高くなっているが、特に負荷が増すに従って、その傾向が強い。また、長周期側で差が大きくなっている。また、理論式では復元モーメント係数として

振り子板の自重および振り子板に作用する浮力から求めたが、 $\sqrt{K/I}$ より計算した ω_0 は実験に用いた ω に比較してかなり小さな値となる。実験結果から推測される ω_0 は $4.8 \text{ rad} \cdot \text{sec}^{-1}$ ($T_0=1.3 \text{ sec}$) 程度と考えられ、 K 値の求め方には不明な点があるので、今後、実験等で詳しく検討していく必要がある。

5. 現地試験

現地試験は、北海道の日本海側にある増毛港北防波堤 (水深 12m) の直立部をなすケーソンの一室に設けられた、幅 3m、高さ 5.3m の振り子板による波力発電システム⁷⁾について行なったものである。

図-5 は波力発電施設の設置状態を示している。振り子板はケーソン遊水部に設置され、また、振り子の振幅を $\pm 15^\circ$ 以内に制限するため、ストッパーが振り子の下部に設けられている。発電システムは、スリット壁から浸入した波により遊水部に設置した振り子板が振動して、油圧を発生し、油圧モータにより発電機を回して電力に変換される。計画最大出力は 20 kw とし、効率を 20% とした場合、 $H_{1/3}=3 \text{ m}$, $T_{1/3}=8 \text{ sec}$ で最大出力となるように計画されている。

入射波のエネルギーは、増毛港の西北西 4 km、水深 -50 m の地点に設置された北海道開発局の超音波波式高計の観測結果から、次式で推定した。

$$W = 0.44 H_{1/3}^3 \cdot T_{1/3} \cdot b \quad (\text{kw}), \quad b: \text{遊水部幅員} \quad \dots\dots\dots (15)$$

また、出力は発電機出力とし、積算電力計の積算値から計算した。結果は表-2 に示してある。

波高が低い方が効率は高く、平均 20% 程度ある。波高が 2 m 以上では、ストッパーへの衝突率が 100% 近くあるので、効率の低下をまねいていると考えられる。全体に、室内実験に比べて効率は低いが、遊水部が段上りになっていること、前方にスリットがあることから、実際に入射するエネルギーは、推定値よりも低くなっていると考えられる。また、システム内の損失を考慮すると、実際の効率はこれよりも高いと思われる。

6. あとがき

本波力発電システムは理論解析、室内および現地試験の結果からみて、かなり有望なシステムであるといえ

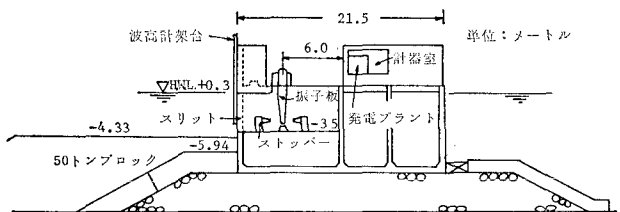


図-5 波力発電施設設置図

表-2 増毛町波力発電プラントの出力例

月・日	時 刻	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	入射エネルギー (kw)	電 力 (kw)	効 率 (%)
11・21	10	2.2	6.9	22.0	4.5	12.4
	12	2.2	7.0	22.4	4.1	11.1
	14	2.3	7.2	25.1	3.5	8.4
	16	1.9	7.0	16.7	3.8	13.8
	18	1.5	6.8	10.1	3.6	21.6
	20	1.5	6.6	9.8	3.3	20.4
	22	1.5	6.2	9.2	2.9	19.1
11・22	8	1.6	6.3	10.6	2.5	14.2
	10	1.6	5.8	9.8	4.3	26.5
	12	1.7	5.7	10.9	3.7	20.6
	14	2.2	6.1	19.5	4.0	12.4
	16	2.3	6.3	22.0	3.5	9.6
	18	2.5	6.8	28.1	4.5	9.7
	20	2.3	6.6	23.1	4.3	11.3
11・23	22	2.2	7.0	23.1	4.8	11.2
	8	1.3	6.6	15.7	3.6	29.6
	12	1.0	6.2	8.7	2.1	31.1

る。今後は、さらに精しい実験を行なうとともに、防波施設としての機能面にも注目し、その安全性についても検討していく所存である。

なお、本研究の一部は昭和 53・54 年度文部省科学研究費試験研究 (2) によって行なったものである。

最後に、本研究を進めるにあたり、室蘭工業大学土木工学科藤間聡助教授からは種々御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。また、増毛町波力発電プラントを実現された増毛町の英断に深い敬意を表する。

参 考 文 献

- 1) 近藤俊郎・渡部富治・高木又男：波力発電の新しい波——固定式共鳴型，OCEAN AGE, Vol. 14, pp. 30～36, 1982.
- 2) 近藤俊郎：防波施設と併用する固定式波力発電装置の研究，昭和 53・54 年度文部省科学研究費試験研究 (2) 研究成果報告書，44 p., 1980.
- 3) 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——波力水車方式——，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 381～385, 1981.
- 4) 井島武士・田淵幹修・湯村やす：矩形断面をもつ浮体の浅海波による自由運動——1. 理論——，第 18 回海岸工学講演会論文集，pp. 173～180, 1971.
- 5) 浅野誠一：岸壁部に設けられた振子式波浪エネルギー回収装置の効率について，日本造船学会水槽委員会第 2 部会 SK 60-14, 1980.
- 6) 前出 3).
- 7) 黒井昌明：増毛港波力発電装置，海と港，No. 5, 北海道港湾海岸研究会，pp. 79～80, 1982.