

## II—2 防波施設に組み込む固定式波力発電装置の研究(2)

## — 波力水車方式 —

室蘭工業大学 正員 ○谷野賢二

室蘭工業大学 正員 近藤徹郎

## 1. ま え が き

石油エネルギー危機以来、新エネルギーの開発が脚光を浴びるようになって来たが、その一つとして波浪エネルギーの開発、利用があり、これまでに多くの考案がなされてきた<sup>1)</sup>。現在提案されている方式の多くは「沖合・浮体方式」<sup>2)</sup>と呼ぶことができるもので、主として沖合に浮いている物体の運動を利用してエネルギーを取り出す方式である。この方式では装置が特定の周波数の波に対して共鳴し、効率良くエネルギーを取ることができる<sup>3)</sup>が、大規模になると係留が難しく、陸上への送電システムの開発と合わせて今後の研究が待たれる。一方、主として海岸付近で、固定された施設の中でエネルギーを取り出す方式は古い歴史を持っている。この方式では陸上部に近い為装置の維持、管理が容易であり、また、取り出したエネルギーの供給先が間近にあるので、建設費は変換装置本体が大部分占め、付属施設の費用が沖合・浮体方式より少なく有利だが、現在のところ、わずかに小規模なものが実現しているだけである。

従来の防波施設の機能と波力エネルギーと有効に利用するエネルギー変換装置としての役割を兼ね備えた、沿岸に固定された波力エネルギー吸収装置について、筆者らは数年前から基礎的な研究を行ってきた<sup>4)</sup>。それは防波堤に組み込まれた振り子型エネルギー変換装置の模型で、波浪エネルギーを空気圧へ変換する方式である。この振り子型の方式は沿岸固定式では従来なかった、特定の周波数の波に対する共鳴が原理的に可能なタイプである。

共鳴型は波の周波数と変換装置の固有周波数を一致させ、波と装置の共振を期待するものであるが、本文は沿岸固定共鳴型の波力エネルギー変換装置の別の方式として、波のエネルギーが水平水粒子運動に集中している重複波の節を利用して水車を回転させる方式を提案し、サボニウス・ロータを用いて行なった基礎的な研究の結果について報告するものである。

## 2. 波力水車の特徴

図-1に見られるように防波堤ケーソンの前壁(波力が直接作用する面)と中詰め材が取り囲まれた構造による波の変形を考える。ケーソン内に入射した波はケーソン後壁で反射し重複波を形成するが、ケーソン奥行きが入射波の波長の $1/4$ 以上であればケーソン内に重複波の節が生ずる。節の位置では波のもつ全エネルギーの大部分が水平水粒子の運動エネルギーであり、水粒子速度は進行波に比べて完全重複波では2倍となる。したがって、重複波の節の位置に波力で回転する水車を設置すれば効率良く波のエネルギーを吸収できると考えられる。これが波力水車の基本的な発想である。波力水車方式では直接機械的な回転運動を得ることができる。重複波の水平水粒子速度と利用する点で、したがって水車位置からケーソン後壁までの奥行き $D$ と入射波の波長 $L$ の比( $D/L$ )によりエネルギー吸収率が変化する点で共鳴型といえることができる。

水車の選定に当たっては、波の水粒子速度が重複波で $2\text{ m/sec}$ 程度と低速であり、往復流であること、さらに潮位の影響についても

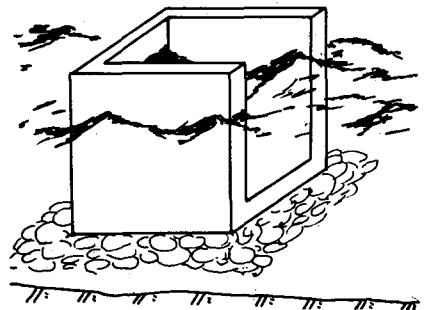


図-1

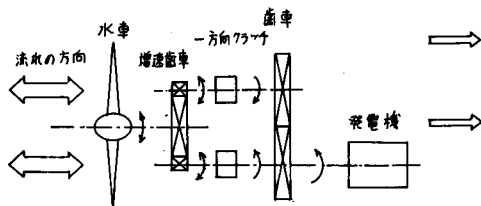


図-2(a)

図-2(b)

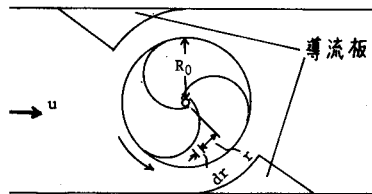


図-3 「導流板」

考慮しなければならない。低速流における水車の利用については潮流発電の研究でいくつかの提案がなされている<sup>5)</sup>。往復流に対して常に一定方向回転を得るには、図-2(a)のようにプロペラ型水車の回転軸に一方向クラッチを介する方法と図-2(b)のように羽根の抗力の不均衡と利用する方法がある。前者はよく知られているようにロビンソン型風速計のロータやサボニウス・ロータがある。波力水車として用いる場合、プロペラ型はロータの単独効率前者より高いが、満潮時に没水、干潮時に半没水となり効率の低下が予測される。また、水車の回転軸は水中にあるので、回転運動を直接海上で利用せず、変換システムの保守、点検上問題がある。一方、回転軸が鉛直線上にある縦軸型サボニウス・ロータは満潮や流水の方向に左右されず、水車の回転軸を直接海上に出せることから維持、管理が楽である反面、抗力差を利用する為に抵抗となる羽根の介在がトルクが低下する。

本研究では、複雑な機構を必要とせず、維持、管理の容易な縦軸型サボニウス・ロータを採用した。さらに、抵抗側の羽根の欠点を改善するために、図-3に見られるような「導流板」を提案している。導流板によって流れが縮減されて流速が高まり、駆動側の羽根だけに流れが作用する事で工率の向上が期待できる。実験に用いたサボニウス・ロータは高さ39cm、直径12.5cmの鋼鉄製3枚羽根である。また、波動実験に用いたケーソン模型の概略は図-4に示す。

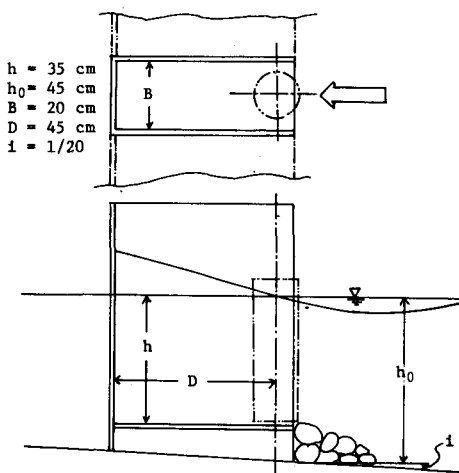


図-4 ケーソン模型の概略

### 3. 水車の運動方程式

鉛直軸をもつ波力水車の運動方程式は次のようにおける。

$$(I + \lambda) \ddot{\theta} + N_w \dot{\theta} = T_w - T \quad \text{--- (1)}$$

ここで  $I$ : 水車の慣性モーメント  $\lambda$ : 水車の中での付加慣性モーメント  
 $N_w$ : 水車の造波抵抗  $T_w$ : 波によって受けるトルク  
 $T$ : 負荷トルク  $\theta$ : 回転中心まわりの角度

図-3のような導流板を有する3枚羽根の水車について考える。この場合、波によって受けるトルク  $T_w$  は以下で与えられる1枚の羽根の受けるトルクにほぼ等しいとみなすことができる。1枚の羽根に作用する流量  $Q$  は、

$$Q = \int_0^{R_0} u_{a,r} \cdot dr \quad (2)$$

ただし、 $h$ : 水深、 $R_0$ : 水車半径、 $u_a$ : 羽根に対する接近水粒子速度である。また、添字  $r$  は半径  $r$  の位置を示す。次に、この羽根に作用するカフは、運動量の定理から、

$$dF = pQ(u_{a,r} - u_{s,r})$$

$$\therefore F = \int dF = p h \int_0^{R_0} u_{a,r} (u_{a,r} - u_{s,r}) dr \quad (3)$$

ここに、 $p$ : 水の密度、 $u_s$ : 羽根から流れ去る水粒子速度である。波によって羽根に作用するトルク $\tau_w$ は、

$$\tau_w = \int dF \cdot r = p h \int_0^{R_0} u_{a,r} (u_{a,r} - u_{s,r}) r dr \quad (4)$$

水車は往復流に対して常に正方向に回転をするので、(4)式中の $u_{a,r}$ は波の $1/2$ 周期で変動する。したがって、 $\tau_w$ の時間平均 $\overline{\tau_w}$ は、

$$\overline{\tau_w} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \tau_w dt = p h \int_0^{R_0} \overline{u_{a,r}} (\overline{u_{a,r}} - \overline{u_{s,r}}) r dr$$

$$= \frac{2 p h \alpha^2}{\pi^2} \left\{ (u_{a,r})_{\max} \right\}^2 R_0^2 - \frac{2}{3} \frac{p h \alpha \beta}{\pi} (u_{a,r})_{\max} R_0^3 \dot{\theta} \quad (5)$$

ここに、 $(u_{a,r})_{\max}$ は接近水粒子速度の時間的最大値であり、

$$\overline{u_{a,r}} = \frac{2\alpha}{T} \int_0^{T/2} u_{a,r} dt = \frac{2\alpha}{T} \int_0^{T/2} (u_{a,r})_{\max} \sin \omega t dt = \frac{2\alpha}{\pi} (u_{a,r})_{\max} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\overline{u_{s,r}} = \beta r \dot{\theta} \quad \alpha, \beta: \text{導流板の形状や羽根の枚数、形状によって異なる係数}$$

$T$ : 入射する波の周期

$\tau_w$ の代わりに(5)式を(1)式に代入すると

$$(I + \lambda) \ddot{\theta} + (N_w + N_s) \dot{\theta} = \tau_w' - \tau \quad (6)$$

ここに、

$$\tau_w' = \frac{2 p h \alpha^2}{\pi^2} \left\{ (u_{a,r})_{\max} \right\}^2 R_0^2, \quad N_s = \frac{2}{3} \frac{p h \alpha \beta}{\pi} (u_{a,r})_{\max} R_0^3$$

(6)式の定常解は

$$\theta = \left[ \frac{2 p h \alpha^2}{\pi^2} \left\{ (u_{a,r})_{\max} \right\}^2 R_0^2 - \tau \right] \lambda / \left\{ N_w + \frac{2}{3} \frac{p h \alpha \beta}{\pi} (u_{a,r})_{\max} R_0^3 \right\} \quad (7)$$

水車のエネルギー吸収工率 $W_k$ は、

$$W_k = \tau \dot{\theta} = \left[ \frac{2 p h \alpha^2}{\pi^2} \left\{ (u_{a,r})_{\max} \right\}^2 R_0^2 - \tau \right] \dot{\theta} / \left\{ N_w + \frac{2}{3} \frac{p h \alpha \beta}{\pi} (u_{a,r})_{\max} R_0^3 \right\} \quad (8)$$

(8)式を $N_w = 0$ として最大吸収工率 $(W_k)_{\max}$ で無次元化すると、

$$\frac{W_k}{(W_k)_{\max}} = 4(\xi - \xi^2) \quad (9) \quad \text{ここに、} \xi = \frac{\pi(\beta/\alpha) R_0 \dot{\theta}}{3(u_{a,r})_{\max}}$$

したがって、最大吸収工率は、 $(\beta/\alpha) = 1$ とすると、

$$R_0 \dot{\theta} = (u_{a,r})_{\max} / 2 \quad (10)$$

のと き生ずる。このことは、水車の羽根先端周速度が接近水粒子速度の時間的最大値のおよそ $1/2$ のと きにエネルギーの最大吸収工率を得ることを示している。このときの負荷トルク $\tau$ は、

$$\tau = \frac{\tau_w'}{2} = \frac{p h \alpha^2}{\pi^2} \left\{ (u_{a,r})_{\max} \right\}^2 R_0^2 \quad (11)$$

したがって、接近水粒子速度 $(u_{a,r})_{\max}$ が推定されると、半径 $R_0$ の水車に加える最適負荷トルクは(11)式によって求まる。

#### 4. 実験結果

導流板は図-5 に示す形状のものを用いた。この形状は水車と導流板の間隙と導流板の高さをそれぞれ変えて行なつた定常流による予備実験から求めた。

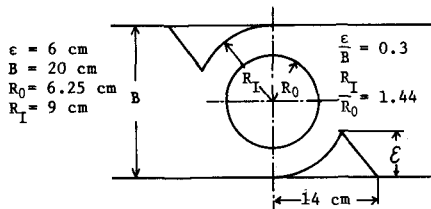


図-5 導流板の形状

水車のエネルギー取得率は図-6 に示されている。ここで言うエネルギー取得率とは、沖波に対して水車がどれだけエネルギーを吸収するかを表わすもので、構造物や捨石基礎による反射、エネルギー損失を差し引いて、実際に水車に入射する波に対する水車のエネルギー吸収効率とは区別される。同図によると、導流板の効果は明確に表われており、導流板の無い場合に比べて導流板が有る方が最大で2.4倍ほどエネルギー取得率は向上する。導流板が無い場合、エネルギー取得率は $D/L$ による変化は少なく、およそ5%である。一方、導流板を付設すると $D/L$ によって多頭型のピークが表われ、取得率の最大値は15%である。 $D/L > 0.2$ のピークは重複波の節における水車の回転として理解できるが、 $D/L < 0.2$ のピークについては説明がつかない。このときの後壁の波高についてスペクトル解析をみると、入射波の倍周波数成分が入射波と同程度に出現していることから、その影響とも考えられる。

図-7 は構造物だけのときの水車位置における水平水粒子速度の時間的最大値と、水車の工率が最大のときの接近流速の時間的最大値および羽根先端周速度を示したものである。それぞれの値は表面波の理論から導き出された式によって求まる水車位置における重複波の時間的最大水平水粒子速度の比で表わされている。理論値は構造物の反射率を1として計算した。

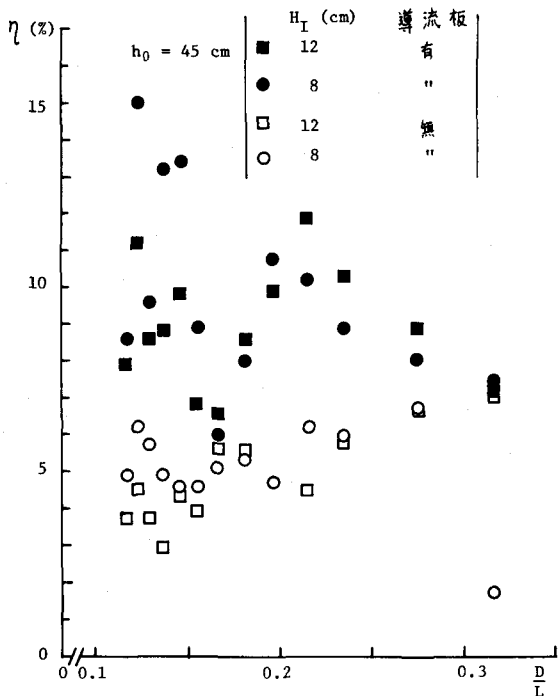


図-6 水車の最大エネルギー取得率

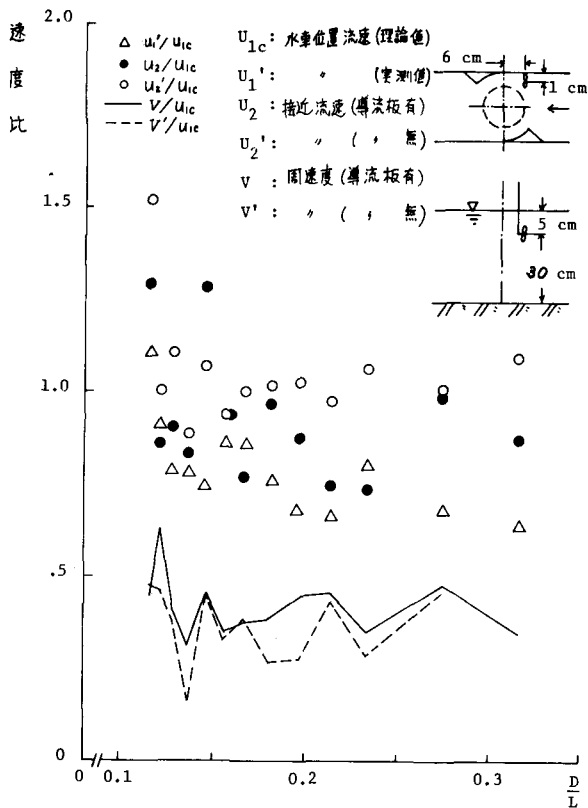


図-7 接近流速と羽根先端周速度

$$(\text{水平水粒子速度の時間的 최대値}) \quad U_{1c} = H_1 C k \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin kx$$

ここに、 $H_1$ : 入射波高、 $C$ : 波速、 $k$ : 波数 ( $2\pi/L$ ) を表わす。  
重積波の水平水粒子速度は理論値の 75% 前後に分布している。  
理論値では反射率を 1 としているが、実際には反射率はそれ以下であるので、その影響で実測値は理論値よりも小さいと考えられる。  
導流板の無い場合、接近流速はほぼ 1 に近いが、導流板の有る場合は 0.85 の前後に分布している。羽根先端周速度は、導流板の有無によって、それぞれ平均 0.4 および 0.35 となっている。したがって、羽根先端周速度は接近流速の実測値と比較してみると、(羽根先端周速度/接近流速) は導流板の有無によってそれぞれ 0.47 および 0.35 となり、前者の方が (10) 式で得られる理論値に近い値を取る。

図-8 は 4 章で求めた (9) 式に従って実験結果をまとめた例である。この場合、理論値は実験値を比較的近似している。

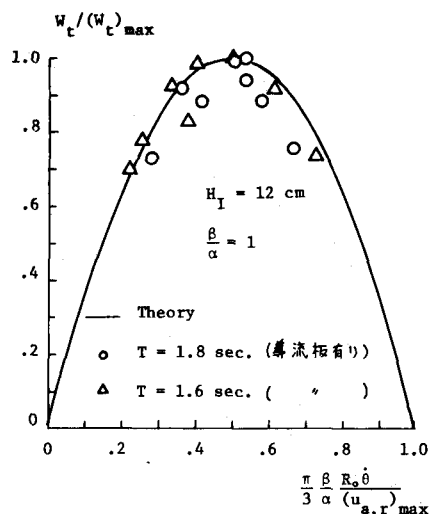


図-8 水車のエネルギー吸収工率

## 5. テスト・プラントの建設

図-9 は今年 3 月に室蘭港北外防波堤沖水深 -4m 付近に設置される波力エネルギー吸収装置のテスト・プラント完成予想図である。図に見られるように、ケーソンに隔壁を設けて 2 室に分割し、一方に波力水車方式、他方に振り子式のエネルギー吸収装置を設置して、実際の不規則浪による装置の特性を把握しようとするものである。今年は波力水車方式について現地実験を行なう。

共鳴型エネルギー吸収装置の特性を調べるにはケーソン奥行と入射波の波長の比  $D/L$  は 0.25 程度必要である。室蘭港における波高と周期の超過出現率図<sup>6)</sup>によると、有義波波高  $H_{1/3} = 1\text{m}$  のとき、同一出現率の周期は  $T_{1/3} \approx 5\text{sec.}$  である。ケーソン内水深を 3m とすると、このときの波長は  $L = 25\text{m}$ 、したがって  $D \approx 6\text{m}$  となる。超過出現率 20% の波を期待すると、この時の周期は  $T_{1/3} = 4\text{sec.}$ 、 $L = 19\text{m}$  であり、したがって  $D \approx 5\text{m}$  となる。そこでテスト・プラントの規模は表のようにした。なお、幅

### テスト・プラントの概要

ケーソン: 重量 309 トン、 $7\text{m}^{(H)} \times 6.1\text{m}^{(B)} \times 8\text{m}^{(D)}$   
水車: 半径 0.8m、長さ 4m、重量約 1 トン  
設置水深: -3.8m、H.W.L +1.5m

員は既存の使用可能なケーソン吊筋型枠と水車半径から決定した。

最終回転数 1000 r.p.m.、増速比 1:100、代表的な接近流速を  $2\text{m/sec.}$  とすると、4 章の (10) 式から水車半径  $R_0$  は約 1m となり、 $R_0 < 1\text{m}$  であれば必要回転数は得られる。吊筋型枠から決まる 1 室の幅員は  $B_1 = 2.3\text{m}$  とするの

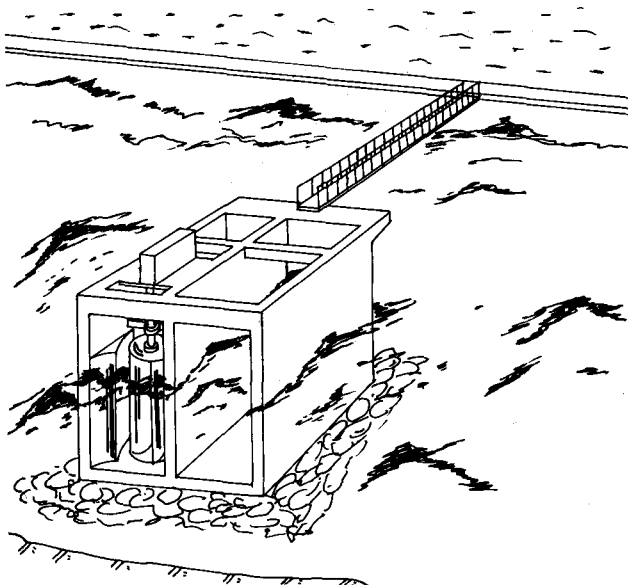


図-9 波力発電テスト・プラント完成予想図

で、導流板と水車の間隔を考慮して  $R_0 = 0.8 \text{ m}$  とした。

## 6. あ と か き

サボニウス・ロータを用いた水車方式による波浪エネルギー吸収装置について、簡単な理論の検討と模型実験から次のような特性が把握された。(1) 理論式によると、エネルギーの最大吸収工率は水車の羽根先端周速度が接近流速のふよ  $1/2$  のとき得られる。模型実験から、(2) 導流板を付設すると水車のエネルギー取得率が向上し、無い場合に比べて最大 2.4 倍となる。(3) 導流板を付設した場合の水車のエネルギー取得率は多頭型のベークをもち、その最大値は 15% である。(4) 最大効率時の水車の羽根先端周速度と接近流速の実測値の比は導流板がある場合約  $1/2$  となり、理論式で近似される。

今後は、現地テストプラントによって不規則波中の装置の特性を検討していくとともに、室内実験によって装置の改良を加えていく所存である。終りに、本研究の遂行には室蘭工業大学機械工学科奥田敬海教授ならびに 2 部機械工学科渡部富治教授より、また、室蘭港テスト・プラントの設計には土木工学科尾崎誠教授ならびに藤間聡助教授より御親切なる御指導と御鞭撻を賜った。実験ならびにデータ整理には土木工学科 4 年自学生垣内 亨、護摩堂 満、白畑利光、藤井 勝の諸氏の熱心な御協力を頂いた。ここに記して厚く謝意を表す。

なお、本研究は昭和 54 年度文部省科学研究費試験研究(2)の一部として行なわれたものである。

## 参 考 文 献

- 1) 前田久明、他：海洋エネルギーの利用、第 4 回海洋工学シンポジウム、I-1、日本造船学会、1979/2
- 2) 近藤叙郎：波浪エネルギーの利用、昭和 54 年度室蘭工業大学公開講座「エネルギー問題を考える」テキスト、1979/9
- 3) たとえば、Mynett, A. E. et al.: Characteristics of Salter's cam for extracting energy from ocean waves, Applied Ocean Research, 1979, Vol. 1, No. 1
- 4) 近藤叙郎、他：防波施設に組み込む固定式水力発電装置の研究—空気圧利用の場合—、土木学会北海道支部論文報告集、第 35 号、1979/2
- 5) 吉本秀幸：黒潮発電の開発利用について、水利科学、No. 23、Vol. 23、1979
- 6) 室蘭港港湾計画資料、室蘭港港湾管理者、1974/5