

II-9 波力水車のエネルギー吸収特性

室蘭工業大学 正会員 近藤 叙郎
 室蘭工業大学 正会員 谷野 賢二
 室蘭工業大学 学生会員 高橋 幹夫

1. まえがき

最近、代替エネルギー開発の必要性が叫ばれ、研究開発が盛んである。海洋エネルギーの利用に関しても、国や大学、民間において研究が行なわれている。室工大では、波力発電実用化へ向けて数年前から実験、研究を行なっており、昭和55年3月には室蘭港絵鞆岬に波力発電実験プラントが設置された。波力発電には、沖合浮体式と沿岸固定式があり、前者は従来より研究が行なわれ、現在は海洋科学技術センターの「海明」が著名である。室工大方式は後者に該当し、防波施設に波力水車を組み込み、重複波の節の水平運動エネルギーを吸収し、消波も行なおうとするものである。今後は、消波機能を持つ沿岸固定式の研究も活発化する傾向にある。

本論文では、波力水車システムによる波の反射特性とエネルギー吸収特性について、実験、理論計算から明らかにしようとするものである。

2. 波力水車システムによる波の反射特性

1). 構造物付近の波形特性

水車および導流板がある場合、模型構造物付近の波が変形することがスペクトル解析で明らかにされた¹⁾。部分重複波の Node の位置において、構造物前面水深 $h_1 = 45\text{cm}$ 、沖波高 $H_0 = 8\text{cm}$ 、導流板ありの場合で、周期 $T = 1.6, 1.8, 2.0\text{sec}$ について、スペクトル解析した結果を図2.2, 2.3, 2.4に示す。いずれも基本周波数の他に同等のパワーを持つ2倍周波数も出現しており、参考文献1)によっても Node 位置、構造物前面では高周波成分が現われていることがわかる。造波水槽には、 $1/20$ 勾配の高さ1m

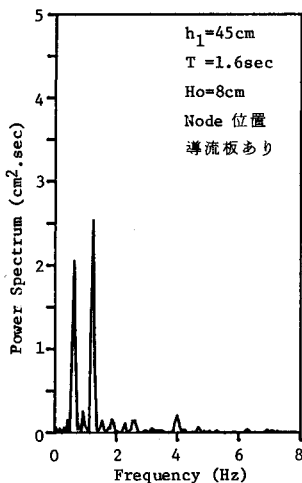
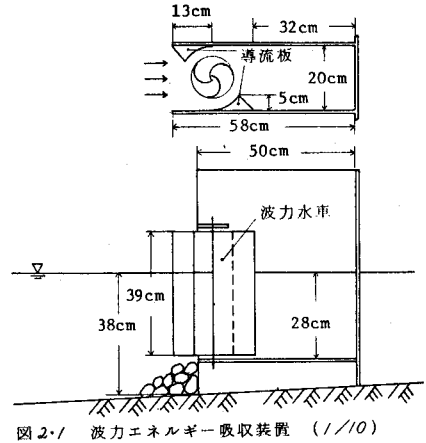


図2.2

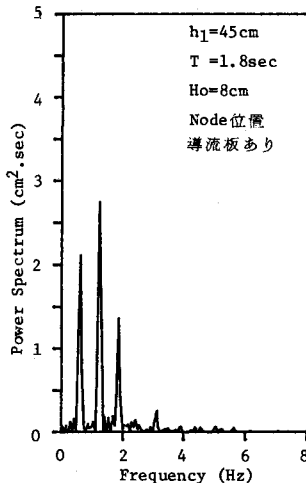


図2.3

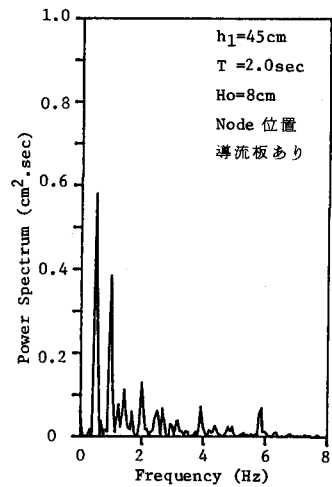


図2.4

幅0.6m、長さ25mの面ガラス張2次元水槽を用いた。模型構造物は図2.1に示すような外形、寸法で、水室は3室に仕切っており、造波板から14.1mの所に設置した。波高計は容量式を用い、Nodeの位置、構造物前面から10cmの位置の波高をデータレコーダに記録し、室工大高速波形解析装置（Genrad社）を用いて解析した。データサイズ $N=512$ 、読取時間間隔 $\Delta t = 1/64 \text{ sec}$ である。

2). 反射率の測定方法

昭和55年度に新たに現地実験プラントの1/20の模型（図2.5参照）を作製したが、これを用いて反射率の実験を行なった。模型構造物は、2室それぞれに導流板を設け、両側にも水車、導流板を取付けたケーソンを設置し、これをダミーとした。実験の種類は、マウンド上水深20cm、周期 $T=0.8 \sim 1.6 \text{ sec}$ 、入射波高 $H_i=3.5, 8 \text{ cm}$ の3種類である。造波板から14.1mの所にマウンドを設け、ダミーと共に構造物を設置した。波高計は容量式のものをを用い、ペンレコーダとデータレコーダに同時に記録した。

反射率の測定方法としては、Healyの方法がよく用いられているが、消波構造物などでは高周波成分が発生しており、この方法では反射率が実際より低くなる傾向がある²⁾。本来は微小振幅で線形性の波に対して適用するものであるので、また前述のように実際に構造物付近では2倍周波数成分も出現しており、本実験のように導流板を有し、水車が回転することにより二次的に波を発生させるような構造物の場合、Healyの方法は適当とは言えない。

高周波成分をも検出できる方法として、M.I.T.³⁾、港湾技研⁴⁾などいくつかの方法があるが、港湾技研の方法を用いた。構造

物前面から沖側に2.5m離れた地点に波高計を2台、30cm間隔で設置し、この2地点の位相差を用いて解析するのであるが、机上での読取計算と電子計算機を使う方法とを両方試みた。前者の方法は、記録紙上の1周期に相当する長さを12等分して読取って計算するものである。後者は高速波形解析装置を用いて解析する方法である。データサイズ $N=512$ 、サンプリング周波数 $f_s=16 \text{ Hz}$ で、データの取込みは波の発生90秒後に5回繰返し、その平均を解析した。

波力水車システムの反射率 K_R ⁵⁾ は、次式を有理化することにより求められる。

$$R_1 = \frac{(1 - \alpha_{1,2})(F_- + \alpha_{3,2}F_+)e^{i\bar{k}_2 l_1} - (1 + \alpha_{1,2})(F_- - \alpha_{3,2}F_+)e^{-i\bar{k}_2 l_1}}{(1 + \alpha_{1,2})(F_- + \alpha_{3,2}F_+)e^{i\bar{k}_2 l_1} - (1 - \alpha_{1,2})(F_- - \alpha_{3,2}F_+)e^{-i\bar{k}_2 l_1}} \dots (2.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに、} \quad \alpha_{1,2} &= \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{\tau - if}} \quad , \quad \alpha_{3,2} = \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_3}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{\tau - if}} \\ F_- &= 1 - e^{-2i\bar{k}_3 l_2} \quad , \quad F_+ = 1 + e^{-2i\bar{k}_3 l_2} \\ \bar{k}_2 &= \frac{\sigma}{\sqrt{gh_2}} \cdot \sqrt{\tau - if} \quad ; \quad \text{抵抗を受けている波の波数} \end{aligned} \right\} \dots (2.2)$$

λ : 領域IIの空隙率; τ : 慣性係数; f : 抵抗係数

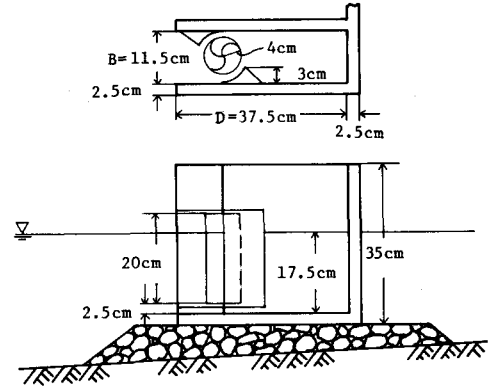


図2.5 波力エネルギー吸収装置 (1/20)

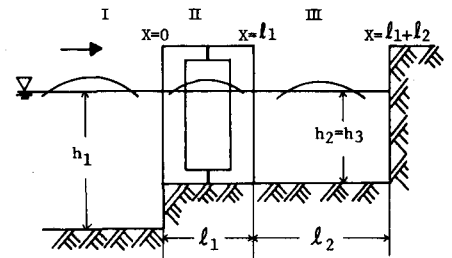


図2.6

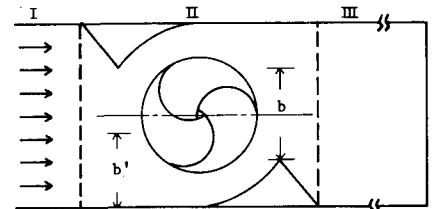


図2.7

抵抗係数 f は、I, II領域の水深変化に伴う損失 S_s 、導流板による水流の急縮、急拡による損失 S_i および水車に作用する波力の反力 F_x を考慮した(2.3)式を用いる。

$$f = \frac{4\lambda}{3\pi l_0} \left(S_s + S_i + \frac{C_p R_0}{B} \right) \cdot |U| \quad \dots (2.3)$$

ここで、

$$S_s = \left(1 - \frac{h_2}{h_1} \right)^2 \quad \dots (2.4)$$

$$S_i = \left(\frac{1}{C_e \cdot b/B} - 1 \right)^2 \quad \dots (2.5)$$

$$C_e = 0.6 + 0.4 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \quad \dots (2.6)$$

$$F_x = \frac{\rho C_0 |u| u}{2} \cdot R_0 \cdot h_2 \quad \dots (2.7)$$

S_s , 導流板による水流の急縮、急拡による損失

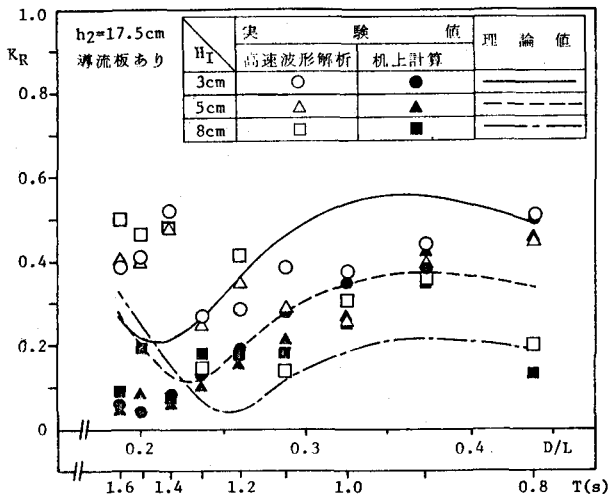


図2.8 D/L, T ~ 反射率

ここに、 b' , b は図2.7に示すように、水車前後での水流の仮想幅である。

(2.3)式からわかるように、抵抗係数 f は流速 U の関数であるので、反復計算を行なった後に(2.1)式を用いて反射率を求めなければならない。その結果を実験結果と共に図2.8に示す。横軸は水室奥行 D と水室内水深における波長 λ との比 D/L と同期 T である。 $T < 1.4$ secでは、机上計算による反射率がかなり低く0.1以下となっている。全同期を通じて高速波形解析による方が反射率が高く、 $T < 1.4$ secではその差が大きくなっている。高速波形解析では80 sec間の平均波形を解析しているのに対し、机上計算では1周期間の波形を解析しているのだが、机上計算で平均的な波形を讀取っていないことが原因と考えられる。従って波形の異なる数波の平均波形を解析する必要がある。 $D/L = 0.23$ 付近で反射率が極小となっているのは、水車位置に重複波の節が存在しているからであると思われる。また、短周期では波高が大きくなるほど K_R は小さくなる傾向があるが、長周期になると逆の傾向を示す。理論計算による結果も同様な傾向を示している。これは、波高が大きい方が水車は回転し易いのでエネルギーがよく吸収され、その結果として反射率が小さくなっていることが推察される。長周期については高周波成分の影響であると考えられる。尚、実験値は基本周波数のみの反射率である。

3. 水車特性の数値解析

1). 理論解析

鉛直軸を持つ波力水車の運動方程式は(3.1)式のようにおける。⁴⁾

$$(I + I_a) \ddot{\theta} + (N_w + N_t) \dot{\theta} + (k + k_t) \theta - T_r \cos 3(\theta - \theta_0) \cos(\sigma t - \delta) = -\tau_{t0} + T_t \{ 1 + \cos 2(\sigma t - \delta) \} \quad \dots (3.1)$$

ここで、 I : 水車の慣性モーメント; I_a : 水車の水中での付加慣性モーメント; N_w : 水車の造流抵抗係数; k : 水車の水中での復元係数; N_t, k_t, τ_{t0} : 負荷の抵抗係数; $T_t = PR^2 h_2 U^2 C_{w0} / 4$; $T_r = 4PR^2 h_2 U^2 C_{w0} / 3\pi$; C_{w0}, C_{w0} : 波力水車に作用するトルクの式 $\tau_w = \tau_0 \pm T_r \cos 3(\theta - \theta_0)$ における、 τ_0 に比例する係数

(3.1)式左辺第4項を無視すると次式のような線形微分方程式となる。

$$\ddot{\theta} + p \dot{\theta} + q \theta = r \cos 2(\sigma t - \delta) + s \quad \dots (3.2)$$

この水車では k, k_t とも小さいと考えられるので、それらを無視すると(3.2)式は次式となる。

$$\ddot{\theta} + p \dot{\theta} = r \cos 2(\sigma t - \delta) + s \quad \dots (3.3)$$

この解は次式で与えられる。

$$\theta = \frac{r}{2\sigma\sqrt{4\sigma^2 + p^2}} \sin\{2(\sigma t - \delta) - \gamma\} + \frac{S}{p}t + C_1 e^{-pt} + C_2 \quad \dots (3.4)$$

ただし, $\delta = \tan^{-1}(2\sigma/p)$

エネルギー吸収工率は

$$W_g = \tau \dot{\theta} = N_t (\dot{\theta})^2 + k_t \dot{\theta} \theta + \tau_0 \dot{\theta} \quad \dots (3.5)$$

で求められ, $N_t = k_t = 0$ のときは

$$W_g = \tau_0 \dot{\theta} \quad \dots (3.6)$$

である。 W_g の1周期間の平均値は, (3.6) 式から

$$\bar{W}_g = \tau_0 \bar{\dot{\theta}} = \tau_0 \cdot (S/p) \quad \dots (3.7)$$

$\bar{W}_g$ の最大値は $\tau_0 = T/2$ のときに出現し, 次式で与えられる。

$$\bar{W}_{g, \max} = \frac{T^2}{4N_w} = \frac{P^2 R_0^4 h_2^2 U^4 C_{to}^2}{64 N_w} \quad \dots (3.8)$$

入射波の平均工率は, 次式で与えられる。

$$\bar{W}_i = B \bar{E}_t C_{g,i} = \frac{\omega_0 H_i^2}{8} B C_{g,i} \quad \dots (3.9)$$

ここに, $C_{g,i}$ は入射波の群速度である。

水車の効率は, 水車および導流板がなく背後の不透壁もない構造でのⅢ領域への伝達波の工率 $\bar{W}_i'$ に対する $\bar{W}_g$ の割合であるから

$$\eta_e = \frac{\bar{W}_g}{\bar{W}_i'} \times 100 \quad \dots (3.10)$$

となる。

2). 実験方法および結果

波力水車の軸にトルクメーターを接続し, 負荷トルクを変化させ, 動歪計で増幅した後ペンレコードに記録した。同時に沖波高と, 水車の軸に取付けてある回転計によって回転数も記録した。実験の種類は, 導流板あり, 導流板なしのそれぞれについて, 構造物前面水深 $h_1 = 38, 45 \text{ cm}$, 同期 $T = 1.0 \sim 2.2 \text{ sec}$, 沖波高 $H_0 = 8, 12 \text{ cm}$ である。

D/L とエネルギー変換効率 η_e との関係を図 3.1, 3.2 に示す。 $h_1 = 38 \text{ cm}$ の場合, $T = 1.8 \text{ sec}$ を境に, $h_1 = 45 \text{ cm}$ の場合は $T = 1.6 \text{ sec}$ を境に左右に2つのピークが存在する。 $D/L = 0.25$ 付近で η_e が極大となっているのは, 水車位置に重複波の節が来ているためであろう。導流板ありの場合, $D/L > 0.16$ では H_0 が大きいほど η_e は大きい, $D/L < 0.16$ では逆の傾向を示す。 $h_1 = 38 \text{ cm}$ では全体的に激しく振動してい

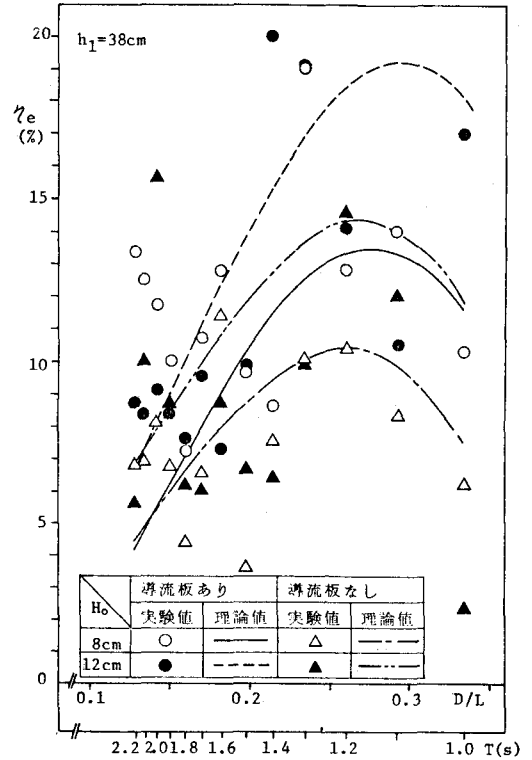


図 3-1 D/L, T ~ 変換効率

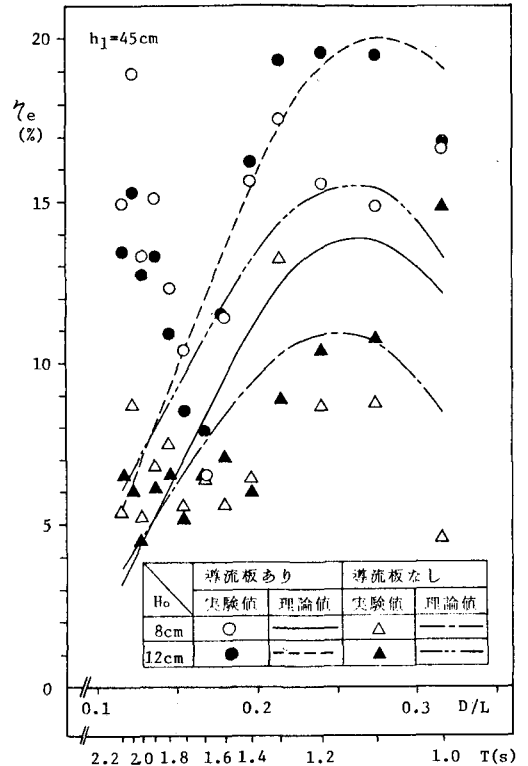


図 3-2 D/L, T ~ 変換効率

るが、導流板なしの場合は $H_0 = 8.12 \text{ cm}$ も振幅の差はあれ、極大・極小をとる周期が殆ど一致している。

理論計算による水車のエネルギー変換効率も同図に示した。ピークは $\rho/L = 0.25$ 付近にあり、 H_0 が大きくなると η_e も大きくなりピークの位置も右の方にずれる傾向がある。 $\rho/L > 0.16$ では実験値の傾向と似ているが、 $\rho/L < 0.16$ になるとこの曲線では説明がつかなくなる。従って、線形微分方程式では長周期の現象を説明できないので非線形微分方程式を解かなければならない。

3). 数値解析

先に得られたエネルギー変換率は、非線形項を無視することにより求めたものであり、長周期では実験の傾向を表わしてはいない。実際には、2章で明らかにされたように2倍周波数の波も発生しており、これらの現象を説明するには非線形項はどうしても無視できない。従って数値解析により解かなければならない。

いまここで、減衰が速度に比例し、ばね剛性が周期 $T = 2\pi/\omega$ の正弦波形の変形をする場合の可変ばねの運動方程式 (3.11) を考える。

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + (p_0^2 - 2\alpha \sin 2\omega t)x = 0 \quad \dots (3.11)$$

この運動が定常運動になるときの解を、周期 $T = 2\pi/\omega$ を持つ級数

$$x = A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t + A_3 \sin 3\omega t + B_3 \cos 3\omega t + A_5 \sin 5\omega t + B_5 \cos 5\omega t \dots (3.12)$$

で表わし、逐次近似法を応用する。(3.12) 式を (3.11) 式に代入し、 $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ 等の係数を0とおけば (3.13) 式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} A_1(p_0^2 - \omega^2) - 2n\omega B_1 - \alpha B_1 + \alpha B_3 &= 0 \\ B_1(p_0^2 - \omega^2) + 2n\omega A_1 - \alpha A_1 - \alpha A_3 &= 0 \\ A_3(p_0^2 - 9\omega^2) - 6n\omega B_3 - \alpha B_1 + \alpha B_5 &= 0 \\ B_3(p_0^2 - 9\omega^2) + 6n\omega A_3 + \alpha A_1 - \alpha A_5 &= 0 \\ A_5(p_0^2 - 25\omega^2) - 10n\omega B_5 - \alpha B_3 + \alpha B_7 &= 0 \\ B_5(p_0^2 - 25\omega^2) + 10n\omega A_5 + \alpha A_3 - \alpha A_7 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (3.13)$$

(3.13) 式の第5, 6式で A_7, B_7 を省略して A_5, B_5 を求め、これを第3, 4式に代入して A_3, B_3 を求める。更にこれを第1, 2式に代入して A_1, B_1 を求め、 B_1/A_1 を計算すると (3.14) 式のようになる。

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{p_0^2 - \omega^2 - \alpha c}{2n\omega + \alpha + \alpha d} = - \frac{2n\omega - \alpha + \alpha d}{p_0^2 - \omega^2 - \alpha c} \quad \dots (3.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで, } a &= \frac{(p_0^2 - 25\omega^2)\alpha}{(p_0^2 - 25\omega^2)^2 + (10n\omega)^2}, \quad b = \frac{10n\omega\alpha}{(p_0^2 - 25\omega^2)^2 + (10n\omega)^2} \\ c &= \frac{(p_0^2 - 9\omega^2 - \alpha a)\alpha}{(p_0^2 - 9\omega^2 - \alpha a)^2 + (6n\omega + \alpha b)^2}, \quad d = \frac{6n\omega\alpha}{(p_0^2 - 9\omega^2 - \alpha a)^2 + (6n\omega + \alpha b)^2} \end{aligned} \right\} \dots (3.15)$$

第3近似解は次式で表わされる。

$$x = C \sin(\omega t + \beta) + \sqrt{c^2 + d^2} C \cos(3\omega t + \beta) + \sqrt{(c^2 + d^2)(a^2 + b^2)} C \sin(5\omega t + \beta) \dots (3.16)$$

ここで、

$$C = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}, \quad \beta = \tan^{-1}(B_1/A_1) \quad \dots (3.17)$$

また、 A_1, B_1 の解が0でないための条件は次式のようになる。

$$(p_0^2 - \omega^2 - \alpha c)^2 = \alpha^2 - (\alpha d + 2n\omega)^2 \quad \dots (3.18)$$

(3.17) 式の振幅は定まらないので、 A_1, B_1 のいずれかを仮定することが必要となる。第2次近似解を計算するには、(3.15), (3.16) 式で $a = b = 0$ とおけばよく、さらに $c = d = 0$ とおけば第1次近似解が求まる。(3.2) 式に可変ばねの方法を適用するために、 $p = 2n$, $t = 2\alpha x$, $\rho x - S = p_0^2 x$, $\omega = \sigma$, $x = \theta$ とおき、 θ を仮定してやり、(3.16) 式で繰返し計算をすることにより、水車の回転運動の解 θ を求め

なければならない。

4. あじがき

波力水車を有する構造物付近では高周波成分が発生していることがスペクトル解析で確かめられた。このような高周波成分も検出できる方法を用いて反射率を推定した。この成分が更に水車のエネルギー変換効率にも影響を及ぼし、 $R/L < 0.16$ でもう一つのピークを作っている。線形理論による反射率、効率の推定は、一応満足できる成果が得られたと考える。しかし、効率については線形理論では説明のつかない現象もあるので、今後は非線形理論による解法を確立していかなければならない。

終わりに、数値計算で御指導下さいました河海研究室の藤間 聡助教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1). 近藤・谷野・高橋：波力水車と構造物による波の変形，土木学会北海道支部論文報告集第36号，PP. 131 ~ 136，1980.
 - 2). Goda, Y. and Y. Abe: Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst. Vol. 7, No. 3, pp. 3 ~ 58, 1968.
 - 3). Madsen, O. S. and S. M. White: Reflection and transmission characteristics of Porus rubble mound breakwaters, Rt. No. 207, Ralph M. Parsons Lab., Dept. of Civil Eng., School of Eng., MIT, 183 p., 1975.
 - 4). 合田・鈴木・岸良・菊地：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料 No. 248, 24 p., 1976.
 - 5). 近藤徹郎：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.
 - 6). 前出 5)
 - 7). 今モシエンコ，S: 工業振動学，東京図書，440 p., 1956.
- 全体を通じて，
- 8). 垣内・護摩堂・白畑・藤井：防波堤に併設される波力水車式エネルギー吸収装置の特性，昭和54年度卒業論文，1979.