

II-3 波力水車と構造物による波の変形

室蘭工業大学 正会員 近藤 徹郎

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

最近のエネルギー事情から石油に代わるエネルギーの開発が期待されており、太陽熱、地熱、風力、海洋エネルギーなど各方面で研究、実験が行なわれている。無資源国である日本にとって、これら再生可能なクリーンエネルギーを利用することが必要である。中でも波力エネルギーはまわりをすべて海で囲まれている日本に適している。波力エネルギー吸収の様式には、沖合浮体方式と沿岸固定方式とがあり、前者には山形県由良沖で現在試験中の「海明」などがあり、室工大では沿岸固定方式を採用している。室工大方式は防波施設に装置を組み込み、波のエネルギーを吸収する仕組みになっていて、波力エネルギーの吸収により反射率が低くなり、消波機能も併せ持っているのが画期的な方式といえる。エネルギー吸収装置の一方式として、波力水車方式がある。

本論文は、水車方式の特性を、A. 水車のない場合、B. 水車を有する場合、C. 導流板を併用する場合の3種類のタイプについて、(1). 波高分布、(2). スペクトル解析、(3). 反射率、(4). 流速分布の4項目から考察しようとするものである。

2. 実測値による堤体前後の波高分布

1). 実験装置

実験には $1/20$ の勾配を持つ高さ 1 m 、幅 0.6 m 、長さ 25 m の両面ガラス張り2次元水槽を用いた。傾斜は造波板から 9 m の所からついていて、波高計は容量式波高計を使用し、ペンレコーダに記録した。本実験に用いた模型構造物は、高さ 60 cm 、幅 60 cm 、奥行 50 cm の箱形の1側面を取った形のもので水室を3室に仕切っている。波力水車は直径 13 cm 、高さ 39 cm の3枚翼サーボウス型水車を用了。図-1に構造物と波力水車の概略を示す。導流板は図-2に示すような形状、寸法であり、図のように設置される。これは3枚翼に有効に力が働くように、波を片寄せすることを目的として作られたものである。

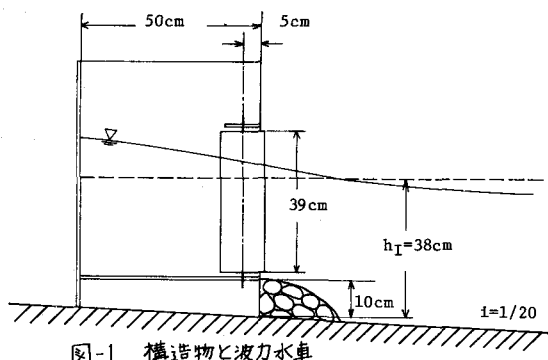


図-1 構造物と波力水車

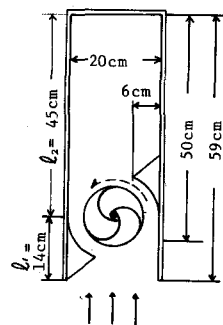


図-2

2). 実験種類、方法

斜面上、造波板から 14.1 m の位置に構造物を設置し、A, B, C の3種類のタイプについて実験を行なった。周期 $T = 1.6\text{ sec}$ 、沖波高 $H_0 = 5\text{ cm}$ 、構造物前面水深 $h_0 = 38, 45\text{ cm}$ の場合について、構造物の後壁から $1/2$ 波長の位置まで水平に 5 cm 毎に波高を測定した。

3). 結果および考察

図-3に波高分布を示す。A→B→Cとなるにつれて分布は偏平化して波高は小さな値をとる傾向があるが、 $h_I = 38$ cmでは構造物前面+45 cm、 $h_I = 45$ cmでは+15 cmの位置まではこの傾向があてはまらず、+20 cm付近でC→B→Aと小さくなっている。A、B、Cの3種類のタイプとも最小値をとる位置は同じで、 $h_I = 38$ cmでは+15 cm、 $h_I = 45$ cmでは+20 cmの位置に波の谷が位置する。これらの位置は後壁から $1/4$ 波長沖側の位置にほぼ一致しており、この場合は水車、導流板による大きな変形は見られない。

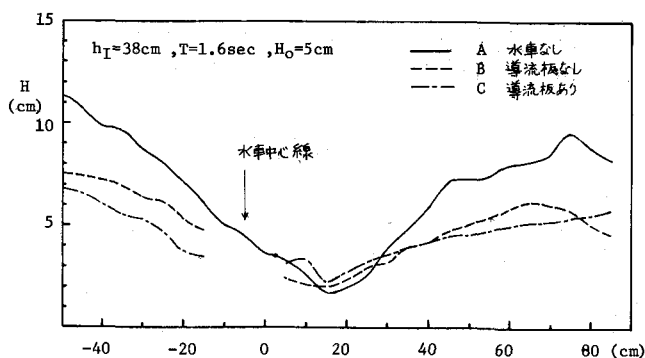


図-3 波高分布

3. スペクトル解析

1). 実験装置、種類および解析方法

水車や導流板がある場合、構造物付近の波が変形するが、この波をスペクトル解析することにより、導流板の有無による波の特性を調べてみた。波高計は、造波板から5 mの位置、節の位置、構造物前面から10 cmの位置、構造物後壁から4 cmの位置に設置し、それぞれ沖波高 H_i 、ノード波高 H_n 、前面波高 H_f 、後壁波高 H_b を測定した。記録にはデータレコーダを、解析には室工大高速波形解析装置(米国Genrad社)を使用した。解析した波の種類は、 $h_I = 38$ cm、 $T = 1.3, 1.4, 1.6, 1.9$ sec、 $H_0 = 5, 8, 12$ cmと $h_I = 45$ cm、 $T = 1.3, 1.6, 1.8, 2.0$ sec、 $H_0 = 5, 8, 12$ cmである。

解析方法として、時間領域データを高速フーリエ変換によってフーリエ成分を求めた後にスペクトルを求める方法をとった。データサイズ $N = 512$ 、読取時間間隔 $\Delta t = 1/32$ secとした。

2). 結果および考察

図-4～12に解析結果を示す。横軸は周波数(H_z)、縦軸は波のエネルギー・スペクトル密度($\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)を表わす。各水深、波高、周期において、節と構造物前面では導流板がある方が波のスペクトルが大きいことがわかる。後壁では逆に導流板のない方が大きくなっている。これはちょうど波高分布の傾向と似ている。周波数成分から見ると、節の位置では2倍周波数までが卓越しており、構造物前面と後壁では周期により卓越する周波数が異なる。導流板の有無から見ると、同じ様な周波数成分が卓越していると言える。

4. 反射率

1). 実験種類、方法

反射率は3種類のタイプについて、 $h_I = 38, 45$ cm、 $H_0 = 5, 8, 12$ cm、 $T = 1.4 \sim 2.2$ secの場合をHealyの式 $K_R = (H - H_{\min}) / H_I$ により求めた。ここで、入射波高 H_I は構造物のない状態での H_0 と H_b の関係から推定したものである。

2). 結果および考察

図-13～15に反射率 K_R を示す。横軸には B/L (B : 水車中心線から後壁までの長さ、 L : 波長)と T をとった。全体的に、波高が大きくなるにつれて反射率が小さくなり、分布の範囲が広くなることがわかる。部分的

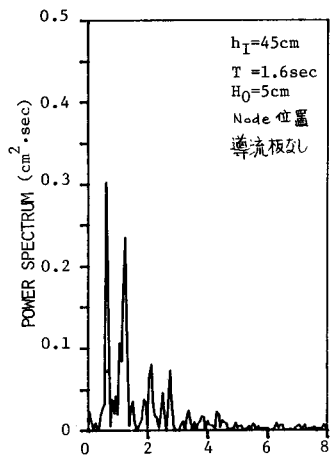


図-4

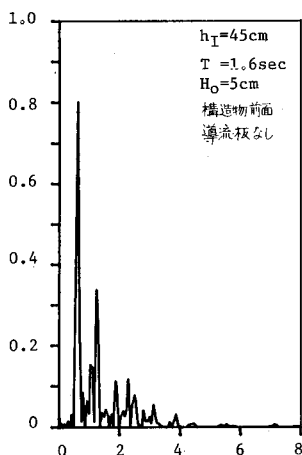


図-5

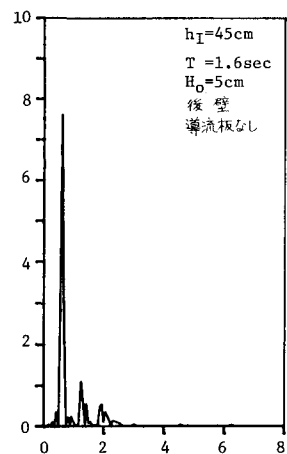


図-6

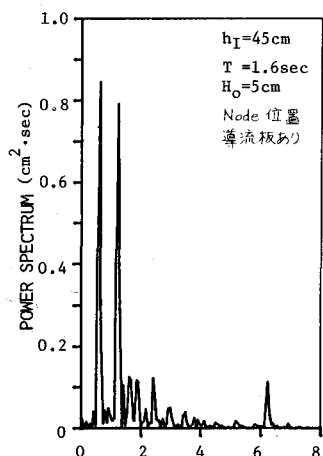


図-7

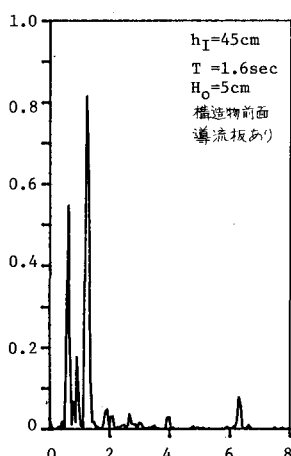


図-8

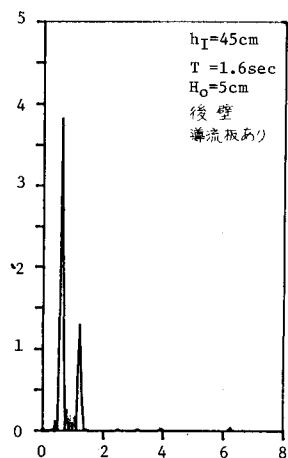


図-9

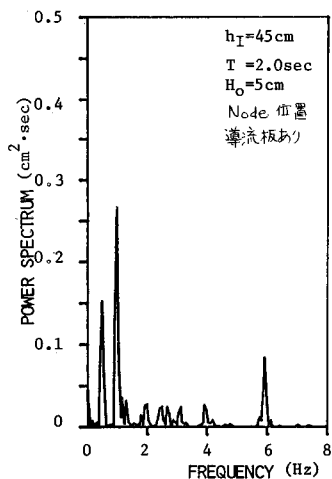


図-10

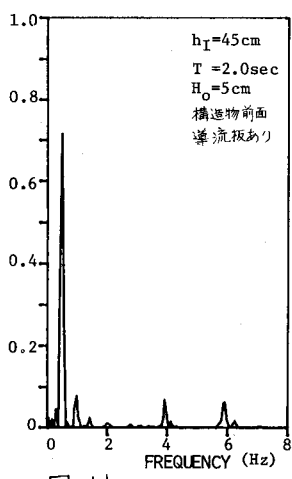


図-11

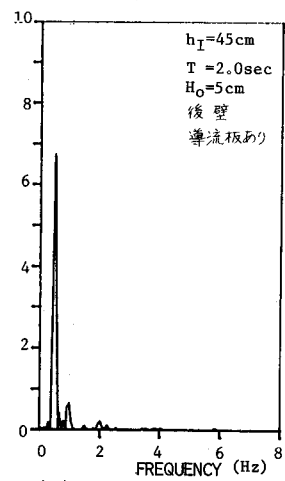


図-12

に当てはまらない場合もあるが、導流板を取付けることによって水車の回転が良くなり、反射率が低下するといえる。また、3種類のタイプともそれぞれ2~3個の極小値を持っており、導流板がある場合 $T = 1.5, 1.9 \text{ sec}$ で極小となり、導流板がない場合でも $T = 1.5 \text{ sec}$ で極小となっている。B, Cタイプでは高周波成分が出現していて波が変形しているの、ここで得られた Healy の方法による反射率はかなり誤差があると思われる。

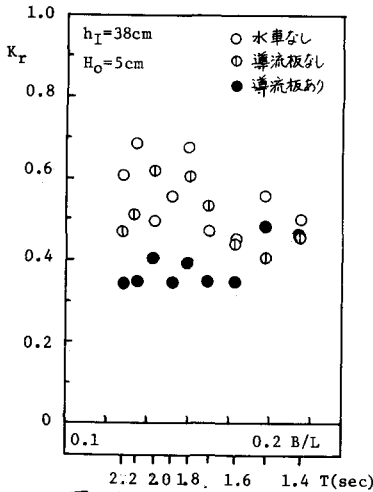


図-13

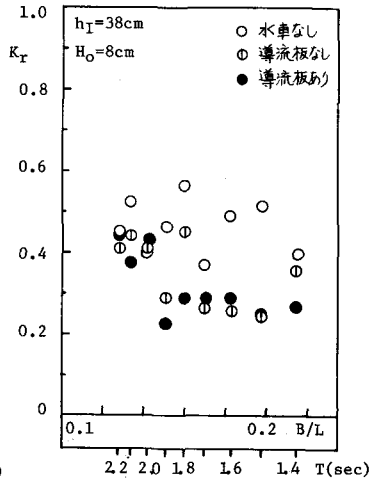


図-14

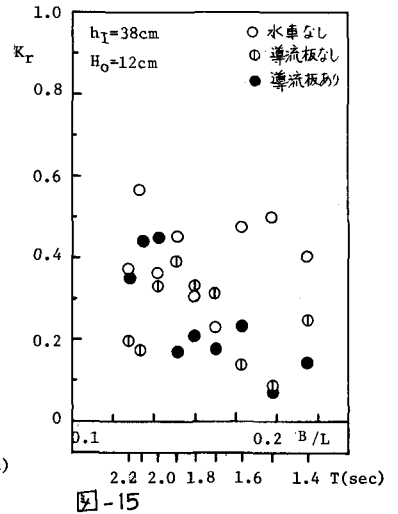


図-15

波力水車が構造物内で回転している場合の反射率などの波の変形を理論的に推定する方法を次に考える。静的な状況下での波浪変形に関しては、不透水マウンド上にある「有限幅員の透水路層を有する不透過堤」として取扱うことにすれば、著者の一人による理論⁹⁾が適用できる。

その概略は以下のようである。

小振幅長波では、I, III領域の連続、運動の式は

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \dots (2)$$

領域IIでは、透水路層で抵抗があるので

$$\lambda \frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots (3), \quad \frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f \frac{\sigma}{\tau} u = 0 \dots (4)$$

ここに、 λ :空隙率、 τ :慣性係数、 f :抵抗係数

(1), (2)の解は

$$\eta = a e^{i(\sigma t - kx)} + b e^{i(\sigma t + kx)} \dots (5)$$

(3), (4)の解は

$$\eta = a e^{i(\sigma t - \bar{k}x)} + b e^{i(\sigma t + \bar{k}x)} \dots (6), \quad \bar{k} = k \sqrt{\tau - i f} \dots (7)$$

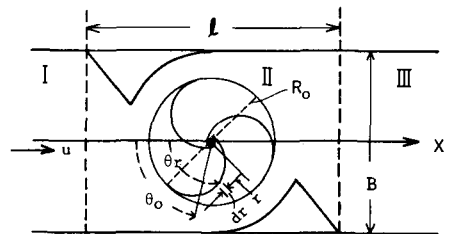


図-16

境界条件は次のようになる。

$$x=0 \text{ で } h_1 u_1 = h_2 u_2, \quad \zeta_1 = \zeta_2 \quad \dots (8)$$

$$x=l_1 \text{ で } h_2 u_2 = h_3 u_3, \quad \zeta_2 = \zeta_3 \quad \dots (9)$$

$$x=l_1+l_2 \text{ で } u_3 = 0 \quad \dots (10)$$

(5), (6) に境界条件 (8), (9), (10) を適用し,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{1,2} &= \frac{h_2}{h_1} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{\tau - if}}, \quad \alpha_{3,2} = \frac{h_2}{h_3} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{\tau - if}} \\ \Gamma_- &= 1 - e^{-2ik_2 l_2}, \quad \Gamma_+ = 1 + e^{-2ik_2 l_2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

とおくと, $R_1 (= b/a_1)$ は,

$$R_1 = \frac{(1 - \alpha_{1,2})(1 + \alpha_{3,2})e^{i\bar{k}_2 l_1} - (1 + \alpha_{1,2})(1 - \alpha_{3,2})e^{-i\bar{k}_2 l_1}}{(1 + \alpha_{1,2})(1 + \alpha_{3,2})e^{i\bar{k}_2 l_1} - (1 - \alpha_{1,2})(1 - \alpha_{3,2})e^{-i\bar{k}_2 l_1}} \quad \dots (12)$$

となり, 反射率 k_r は R_1 を有理化したものである。

しかし, 本実験の場合, 水車の運動によって水に反力が働いているので静的な運動方程式 (4) を修正することが必要となる。同式は単位重量の水に働く力のつりあい式となっていることに留意すると, その場合の反力は

$$R = -\frac{F_x}{\rho B l h_2 \lambda} = -\frac{\bar{u}_a^2 k_r (1-C) R_0 \sin \theta}{B l \lambda} \quad \dots (13)$$

ここに,

$$k_r = \frac{\int_0^{R_0} \bar{u}_{ar} dr \sin \theta_r}{\bar{u}_a^2 R_0 \sin \theta}, \quad C = \frac{h \int_0^{R_0} \bar{u}_{ar} \bar{u}_{er} \sin \theta_r}{k_r Q_e \bar{u}_a}$$

F_x : 水車の羽根に作用する x 方向の力; h_2 : 水室内水深; θ : 羽根の x 方向となす角の平均値; Q_e : 1 枚の羽根に作用する流量; $\bar{u}_{ar}$: 水車中心軸から r の点の流速; $\bar{u}_{er}$: 周速度の平均値; $\bar{u}_a$: 平均流速

この R を (4) の右辺に加えると

$$\frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + f_0 \frac{\sigma}{\lambda} u = -M u^2 \sin \theta \quad \dots (14)$$

$$\text{ここで, } M u^2 = \frac{\bar{u}_a^2 k_r (1-C) R_0}{B l \lambda} \quad \dots (15)$$

$$\frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\sigma}{\lambda} \left(f_0 + \frac{8 \lambda M}{3 \pi \sigma} U |\sin \theta| \right) u = 0 \quad \dots (16)$$

ここに, M : 動的抵抗係数 (式 (15))

$U = u e^{-i\sigma t}$ で, 参考文献 1) の (4.13) 式で与えられるものである。

$$f_0 + \frac{8 \lambda M}{3 \pi \sigma} U |\sin \theta| = f_1 \quad \dots (17)$$

とおくと, (16) は

$$\frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + f_1 \frac{\sigma}{\lambda} u = 0 \quad \dots (18)$$

となり, f_0 の代わりに f_1 を用いて解いていくと, 水車の運動しているときの反射率が求まる。 f_0 の推定には, 水車・導流板の存在する II 領域をスリットと考え, $f = \frac{8 \lambda}{3 \pi} \frac{\lambda}{2 \sigma L} (\frac{1}{\tau \lambda} - 1)^2$, $C = 0.6 + 0.4 \lambda^2$ によって計算する。では流路の曲がりくねりの度合を示すもので, II 領域を水粒子が移動した長さを l' とすると $\tau = l'/l_1$

で表わされる。

5. 流速分布

1). 実験装置、種類および方法

流速計を図-17のように2台据付け、 $h_1=38, 45\text{ cm}$ 、 $T=1.6\text{ sec}$ 、 $H_0=5, 8, 12\text{ cm}$ の場合について、流速計を鉛直方向に5 cm間隔で移動させて流速を測定した。

2). 結果および考察

図-18は $h_1=38\text{ cm}$ 、 $H_0=8\text{ cm}$ の場合の流速分布である。導流板を取付けることにより水車前面最大流速は4割程度小さくなっている。導流板のない場合水粒子は、平面的に見て直線的に移動するが、導流板を設けることにより波は片寄せされ、水粒子は曲線的に運動することや、導流板があると水室内外の水の出入りが導流板のない場合よりもスムーズに行なわれないことがその原因と考えられる。

図-18に微小振幅波理論による完全重複波の水平水粒子速度の最大値を示してある。水車のない場合の前面、後面流速はいずれも理論値より小さくなっており、この理論値で近似することはできない。水車のない場合の後面流速は水面に近づくにつれて減少するような分布をしている。

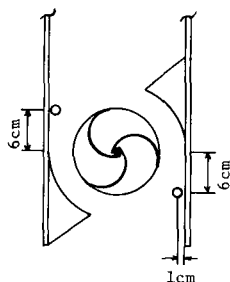


図-17

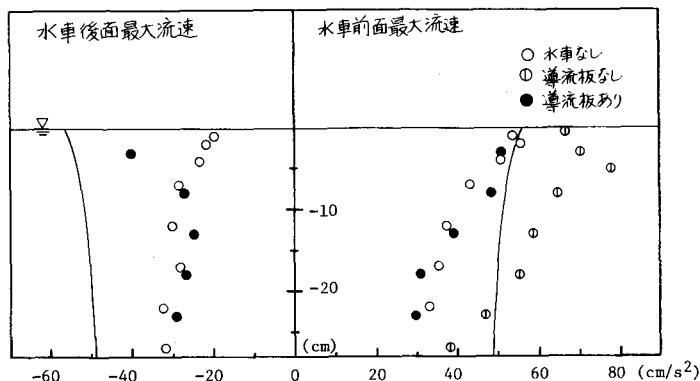


図-18 流速分布

6. あとがき

本論文で扱っている波浪の変形問題は、水室に押寄せた波によって水車が回転するので、静的な問題に比べかなり複雑である。従って、水車方式の特性を知るためには色々な角度から総合的に考えなければならない。4項目ともかなり特徴がつかめたが、今後検討すべき問題点としては次のことがあげられる。(1). スペクトル解析では、今回解析した波の種類が少ないので更に解析を多くして周期による影響を明確にさせる。(2). 反射率では、Healyの方法はこのように変形している波には不適當と思われるので、フーリエ係数を求めて入、波射波を推定する方法を用いる必要がある。理論的推定には、水車の運動を考慮した反射率の理論値と実測値を比較する。(3) 流速分布では、微小振幅波の重複波により求めた流速は実測値と合わないため高周波成分を考慮した高次理論と比較してみる必要がある。本研究は文部省科学研究費試験研究(2)「防波施設と併用する固定式波力発電装置の研究」によるものである。実験データの取得には土木工学科学生、垣内 亨、護摩堂 満、白畑利光、藤井 勝の諸君の協力があつたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 1). 近藤：マウンド上の消波構造物に関する長波理論，土木学会北海道支部論文報告集第36号，1980。