

# 波浪発電装置に関する基礎的研究 —第2報—

## — Salter Duck のエネルギー吸収特性について —

Fundamental Research on a Wave Absorber — 2nd report —

— Characteristics of Salter's Duck with regard to absorbing energy —

前田 久明\*・田中 裕久\*・岩瀬 律雄\*

Hisaaki MAEDA, Hirohisa TANAKA and Ritsuo IWASE

### 1. ま え が き

前報において<sup>3)</sup>, Salter Duck に作用する各種の流体力が求められるので, これらを用いて Salter Duck の運動, エネルギー吸収効率, 透過波, 反射波, 漂流力などの特性を報らかにする. また実験との比較も行う. hydraulic type のエネルギー変換装置を組み込んだ装置による波浪エネルギー吸収の機構を明らかにすることが目的であるので, 実用化はさておいて問題を次のように単純化する. Salter Duck の運動は, 没水円筒の中心軸 G まわりの roll だけを許し, sway, heave は拘束する. 運動あるいは入射波の波高は微小とし, 線型の仮定を設ける. Salter Duck の形状は前報と同じである<sup>3)</sup>.

### 2. エネルギー吸収効率

波浪エネルギー吸収装置を負荷の damping  $d_{4c}$  と復原力をもたせるための Spring のバネ定数  $k_{4c}$  とでモデル化して考えることにする. この場合任意の周波数の規則波中で, エネルギー吸収効率を最大にする条件は, 負荷の damping  $d_{4c}$  がその周波数での造波 damping に等しくなり, かつその周波数で roll が同調するように Spring のバネ定数  $k_{4c}$  が設定されていることである. このような条件のもとで定義される最大エネルギー吸収効率 (ideal max. efficiency)  $\eta$  は次式により求められる<sup>2)</sup>.

$$\eta = \frac{\left| H_{4c} \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right|^2}{\left| H_{4c} \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right|^2 + \left| H_{4c} \left( \frac{\pi}{2} \right) \right|^2} \quad (1)$$

無次元吃水  $T_0/2R_0 = 0.516, 0.759, 0.936, 1.0$  に対する最大エネルギー吸収効率を Fig. 2-1 に示す. 吃水が深くなるほどエネルギー吸収効率が高くなる傾向がみられる. エネルギー吸収効率  $\eta$  の一般式は次の通りである<sup>2)</sup>.

$$\eta = \frac{2\omega^3 \rho d_{4c} \left| H_{4c} \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right|^2}{\left\{ C_{4c} - \omega^2 (M_{4c} + m_{44c}) \right\}^2 + \omega^2 (d_{4c} + N_{44c})^2} \quad (2)$$

ただし,  $C_{4c}$  は Salter Duck が G まわりで単位の回転をした場合の静的復原力であり,  $M_{4c}$  は Salter Duck 本体

\*東京大学生産技術研究所 第2部

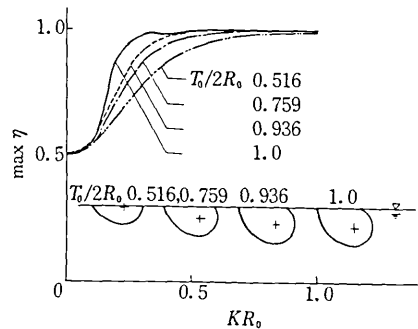


Fig. 2-1 energy absorbing efficiency

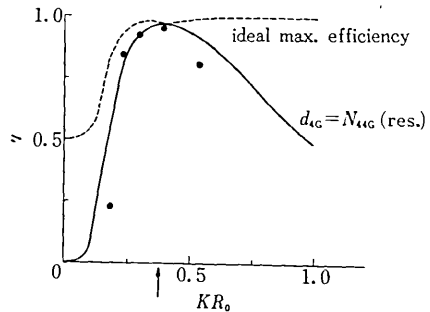


Fig. 2-2 energy absorbing efficiency ( $T_0/2R_0 = 1.0$ ) の G 点まわりの慣性モーメントである. また造波 damping が大であるので粘性 damping は無視出来ると仮定した.  $T_0/2R_0 = 1.0$  の場合に負荷の damping  $d_{4c}$  を, G 点まわりで自由 roll させたときの固有周波数での造波 damping  $N_{44c}(\text{res.})$  に等しいと置いたときのエネルギー吸収効率を Fig. 2-2 に示す. 図中の黒丸は実験値である. 最大エネルギー吸収効率 (ideal max. efficiency) との交点が, G 点まわりで自由 roll させたときの固有周波数に対応する. 計算例の場合には固有周波数  $KR_0 = 0.38$  である<sup>5)</sup>.

### 3. roll 運動

最大エネルギー吸収効率に対応する roll 運動を ideal resonant roll と呼ぶことにする. すなわち, それぞれの入射波の周波数において, 負荷をそのときの造波 damping に等しくおき, Spring のバネ定数をその周波

研究速報 .....  
 数で同調させるようにとときの roll 運動  $l_{4c}$  は次式で与えられる<sup>2)</sup>.

$$\frac{l_{4c}}{Ka} = -\frac{i}{KR_0} \cdot \frac{\frac{K}{R_0} H_{4c} \left(-\frac{\pi}{2}\right)}{\left|\frac{K}{R_0} H_{4c} \left(\frac{\pi}{2}\right)\right|^2 + \left|\frac{K}{R_0} H_{4c} \left(-\frac{\pi}{2}\right)\right|^2} \quad (3)$$

ただし,  $a$  は入射波の振幅であり,  $Ka$  は最大波傾斜となる. 周波数  $KR_0 \rightarrow 0$  に従って, roll 振幅は無限大に近づく<sup>1)</sup>. ideal resonant roll は吃水  $T_0/2R_0$  をパラメータとして, Fig. 2-3 に示す. 次いで roll 運動の一般式は,

$$\frac{l_{4c}}{Ka} = \frac{1}{Ka} \cdot \frac{\rho g a H_{4c} \left(-\frac{\pi}{2}\right)}{C_{4c} - \omega^2 (M_{4c} + m_{44c}) + i \omega (d_{4c} + N_{44c})} \quad (4)$$

$T_0/2R_0 = 1.0$  の吃水で,  $d_{4c} = N_{44c}(\text{res.})$  とした場合の roll を Fig. 2-3 に示す. この場合は,  $KR_0 \rightarrow 0$  に従い, roll 振幅は単位に近づく.

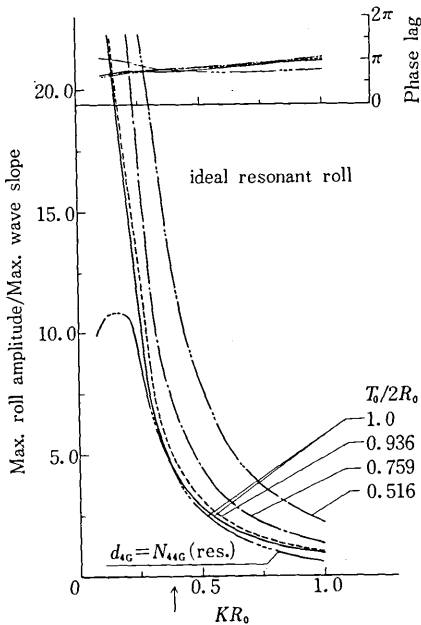


Fig. 2-3 roll motion about G

4. Salter Duck の動力特性<sup>5)</sup>

東大工学部航海性能試験水槽にて, 実験を行った. 実験装置の概略は Fig. 2-3 に示す.<sup>5)</sup> Salter Duck の形状は,

$$r = 33.12 \exp\{0.0157z\} \quad r, z \text{ in cm} \quad (5)$$

没水円筒の半径  $R_0 = 18.5 \text{ cm}$ .  $x$  軸方向の長さ (厚み)  $L = 1.5 \text{ m}$ . 工学単位による, 断面の単位厚み当たりの G 点まわりの慣性モーメントは,  $M_{4c} = 0.312 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2$ , 復原力係数は,  $C_{4c} = 8.65 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \text{m}$  である.

Fig. 2-4 に示す油圧装置で測定される油圧  $P$  と, シリンダーの変位  $X$  から換算測定される流量  $Q$  とより, Salter Duck が吸収するエネルギーは単位時間当たり,  $P \cdot Q$  となる. 基準圧力  $P_w$  と基準流量  $Q_w$  を次式のように定義する.

$$P_w = L \cdot \rho g a s_1^2 / 3 A_1 s_2 \quad (6)$$

$$Q_w = 2a (A_1 + A_2) / T \quad (7)$$

ただし,  $s_1 = 28 \text{ cm}$ ,  $s_2 = 11 \text{ cm}$ . シリンダのロッドのない方とある方の各受圧面積  $A_1 = 3.14 \text{ cm}^2$ ,  $A_2 = 2.36 \text{ cm}^2$ .  $T$  は, 入射波の周期とする. 本装置の G 点まわりの固有周期は,  $T = 1.4 \text{ sec}$  である.

Fig. 2-4 中の (4) の負荷用可変絞りにより負荷の流体抵抗の大きさを変えて, 圧力  $P/P_w$  と流量  $Q/Q_w$  の関係を計測し, Salter Duck の動力特性を求めた. 入射波の周波数  $KR_0 = 0.518, 0.380$  (周期  $T = 1.2 \text{ sec}, 1.4 \text{ sec}$ ) については Fig. 2-5 に,  $KR_0 = 0.291, 0.186$  ( $T = 1.6 \text{ sec}, 2.0 \text{ sec}$ ) については, Fig. 2-6 に, 実験値を白丸で示し, 実験値を結んだ実線を記入してある. また, 白

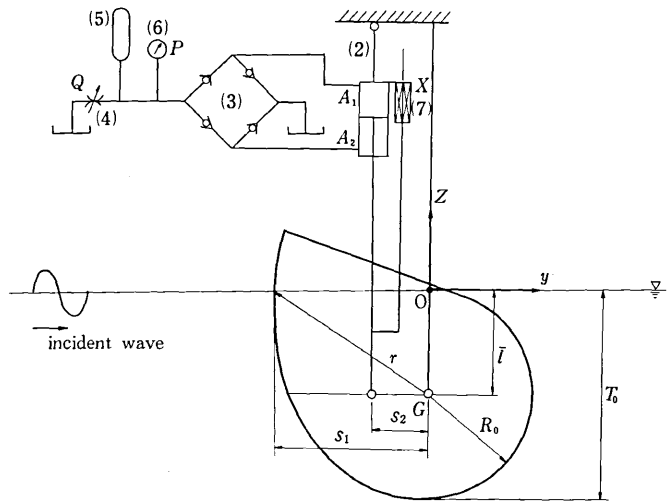


Fig. 2-4 Salter Duck energy absorbing device

丸に対応する次式で計算したエネルギー吸収効率  $\eta$  を黒丸で, Fig. 2-5, 2-6 に示す.

$$\eta = \frac{P \cdot Q}{\frac{1}{2} \rho g a^2 \cdot V g \cdot L} \quad (8)$$

ただし, 群速度  $Vg = g / 2\omega$  である.

ところで, 単位時間に吸収するエネルギーを, 負荷の damping により表示すると,

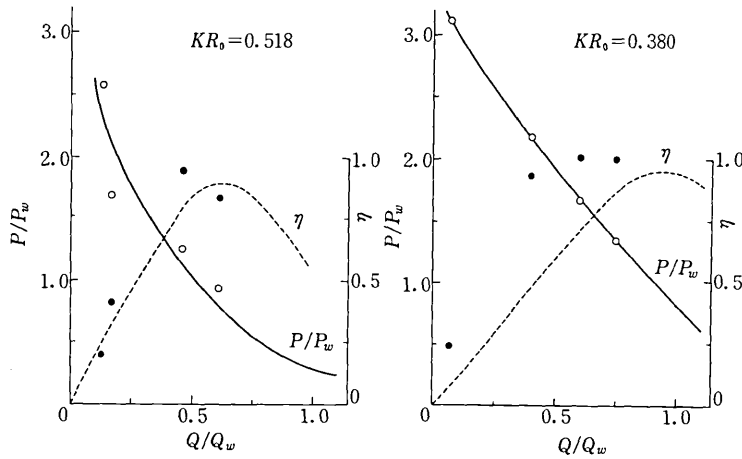


Fig. 2-5 energy absorbing characteristics of Salters Duck.

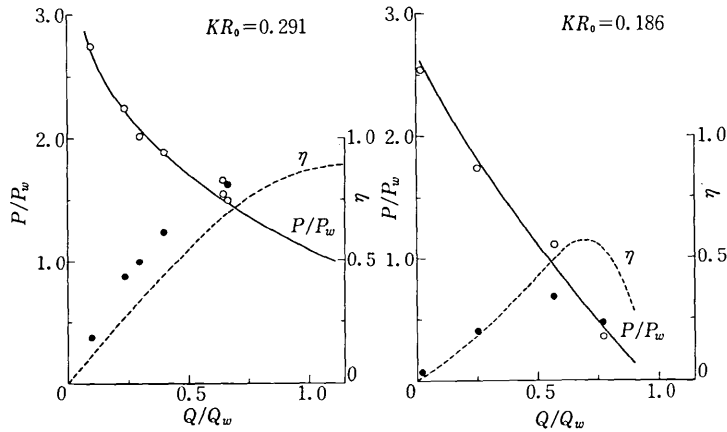


Fig. 2-6 energy absorbing characteristics of Salters Duck.

$$P \cdot Q = \frac{1}{2} \omega^2 d_{4c} \cdot L |l_{4c}|^2 \quad (9)$$

流量  $Q$  と roll 角  $l_{4c}$  の間には,

$$Q = 2 |l_{4c}| s_2 (A_1 + A_2) / T \quad (10)$$

なる関係があるので、動力特性と負荷の damping  $d_{4c}$  との関係は、

$$\frac{P/P_w}{Q/Q_w} = \frac{\pi^2 L Q_w}{2 s_2^2 (A_1 + A_2)^2 P_w} \cdot d_{4c} \quad (11)$$

となる。したがって、動力特性の実験値から負荷の damping を定め、(2) 式を用いてエネルギー吸収効率を計算することができる。Fig. 2-5, Fig. 2-6 の実線で示される  $P-Q$  特性から計算で求めた効率  $\eta$  をそれぞれ図中の破線で示す。

図中で、黒丸が破線より大きくなる場合がみられる。完全な 2 次元問題であればこのようなことは起こり得ないのであって、実験値に 3 次元影響が含まれることを示唆しているものと考えられる。

$P-Q$  曲線で示される動力特性において、流量  $Q=0$  とした場合に生ずる圧力  $P$  は、 $G$  点まわりの波浪強制モーメントにより生ずる圧力である。また圧力  $P=0$  とした場合の流量  $Q$  は、エネルギー吸収装置をとりはずした状態での  $G$  点まわりの波浪中 roll 角に対応するものである。

### 5. 透過波, 反射波および漂流力<sup>2)</sup>

浮体が固定されている場合で、単位振幅 ( $a=1$ ) の入射波  $\varphi_0(\pm \frac{\pi}{2})$  に対する無限遠方での反射波、透過波の振幅をそれぞれ  $\zeta_R^*, \zeta_T^*$  とおく。  $\zeta_R^*, \zeta_T^*$  は次式により Kochin 函数により求められる。

$$H_j^* \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot \zeta_R^* + H_j^* \left( -\frac{\pi}{2} \right) \cdot \zeta_T^* = H_j \left( \frac{\pi}{2} \right) \quad (12)$$

$$H_j^* \left( -\frac{\pi}{2} \right) \cdot \zeta_R^* + H_j^* \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot \zeta_T^* = H_j \left( -\frac{\pi}{2} \right) \quad (13)$$

$j$  としては、sway と heave を用いた。独立な方程式が得られる限り  $j$  の組み合わせは任意である。

研究速報  
 また、反射波、透過波の間には、次の関係が、存在する。

$$\zeta_{\bar{r}} = \zeta_{\bar{t}} = \zeta_r \quad (14)$$

$$|\zeta_{\bar{r}}| = |\zeta_{\bar{t}}| \quad (15)$$

$$\arg(\zeta_{\bar{r}}) + \arg(\zeta_r) = \pi + 2\arg(\zeta_t) \quad (16)$$

次に、浮体が G 点まわりに roll 運動を許されている場合で、単位振幅の入射波  $\varphi_0$  ( $\frac{\pi}{2}$ ) に対する対する無限遠方の透過波、反射波の振幅をそれぞれ  $\xi_{\bar{t}}, \xi_{\bar{r}}$  とおく。 $\xi_{\bar{t}}, \xi_{\bar{r}}$  は浮体の動揺と浮体が固定している場合の透過波  $\zeta_{\bar{t}}$ 、反射波  $\zeta_{\bar{r}}$  より次式にしたがって求められる。

$$\xi_{\bar{t}} = -iKR_o \cdot \frac{l_{4c}}{Ka} \cdot \frac{K}{R_o} H_{4c}\left(\frac{\pi}{2}\right) + \zeta_{\bar{t}} \quad (17)$$

$$\xi_{\bar{r}} = -iKR_o \cdot \frac{l_{4c}}{Ka} \cdot \frac{K}{R_o} \cdot H_{4c}\left(-\frac{\pi}{2}\right) + \zeta_{\bar{r}} \quad (18)$$

波浪エネルギー吸収効率  $\eta$  は

$$\eta = 1 - (|\xi_{\bar{r}}|^2 + |\xi_{\bar{t}}|^2) \quad (19)$$

とも表すことができるので、2次元漂流力  $F_D$  は、

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho g a^2} = |\xi_{\bar{r}}|^2 + \frac{1}{2}\eta \quad (20)$$

と表すことができる。

Fig. 2-7 に  $T_o/2R_o = 1.0$  の場合の透過波と反射波の計算結果を示す。浮体固定の場合と、負荷の damping  $d_{4c} = N_{44c}(res.)$  ように、G 点まわり自由 roll の固有周波数に対応する造波 damping と等しくして浮体の roll を許した場合の 2 つのケースについて求めている。これらの結果はすべて (14), (15), (16) 式の関係満足している。

Fig. 2-8 には吃水  $T_o/2R_o$  を 4 通りに変化した場合の浮体固定時の透過波、反射波の計算結果を示す。

Fig. 2-9 には、吃水  $T_o/2R_o$  を 4 通りに変化した場合の浮体固定時の漂流力係数と  $T_o/2R_o = 1.0$  の場合に限り、 $d_{4c} = N_{44c}(res.)$  として、G 点まわりの roll を許した場合の漂流力係数の計算結果を示す。

### 6. まとめ

- 1) Salter Duck は吃水  $T_o/2R_o$  を深くするにしたがって波浪エネルギー吸収効率が上昇する。
- 2) Salter Duck のエネルギー吸収効率は広い周波数域にわたって良好である。
- 3) エネルギー吸収効率の理論値はおおむね実験値と良い一致をみせているが、推定精度向上には、三次元影響を考慮する必要がある。
- 4) Salter Duck のエネルギー吸収装置としての動力特性は、出力一定形(圧力の流量の積が一定)に近いことが実験により明らかとなった。
- 5) Salter Duck の消波効果の特性ならびに漂流力の特性が明らかになった。(1979年5月16日受理)

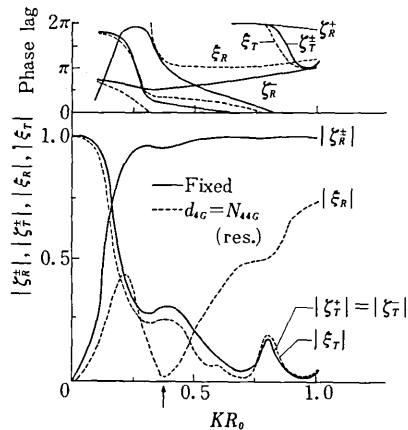


Fig. 2-7 transmitted and reflected waves

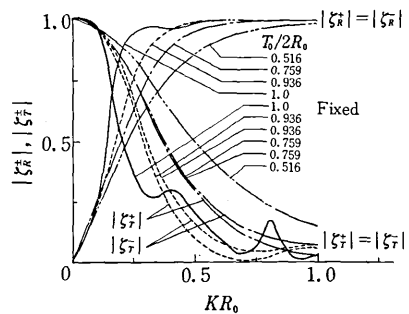


Fig. 2-8 transmitted and reflected waves

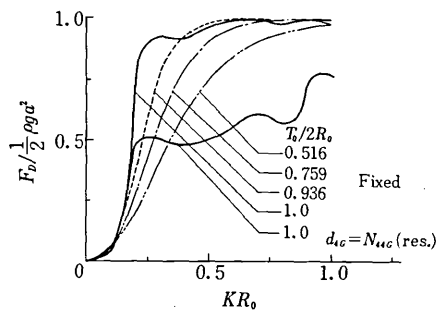


Fig. 2-9 drifting forces

### 参考文献

- 1) 菅 信 ; 非対称浮体による波エネルギーの吸収効率について, 船研講演概要, 1978. 11.
- 2) 前田久明他; 海洋エネルギーの利用, 日本造船学会第4回海洋工学シンポジウムテキスト, 1979. 2.
- 3) 前田久明他; 波浪発電装置に関する基礎的研究-第1報一, 生産研究, Vol. 31, No. 8, (1979.8)
- 4) 高木又男; 浮体に作用する流体力について(漂流力について), 日本造船学会第2回海洋工学シンポジウムテキスト第2章, 1976.
- 5) 田中裕之他; 波力エネルギー吸収装置の動力特性(第一報, 基礎特性) 日本機械学会第56回通常総会講演論文集(予定) 1979.