

密閉型波力発電ケーソンの検討

東北大学大学院 学生員 田中重人
東北大学工学部 正 員 沢本正樹

1. はじめに

現在波力発電ケーソンには、さまざまなものがあるが、機構の違いから2つに大別される。1つは、水面変動から生じる振動気流で直接ウェルズタービンを回す方式であり、もう1つは、弁を用いて振動気流を整流し、通常のタービンを回す方式である。後者の場合、多数のケーソンを沿岸に設置し、気流をまとめて大容量のタービンを回すことができるが、整流機構として破損の危険性が少なく、かつ構造が簡単であるものが望まれる。そこで著者らは、水弁と呼ばれる整流装置を持つ、密閉型ケーソンを想定した。水弁による、整流は図1-1に示す通りであり、これを直列に図1-2のように取り付けると、機械的可動部なしに、1方向流を生み出すことが可能となる。もうひとつの特徴としては、ケーソン内で空気が完全に循環する密閉型であるという点である。密閉型の場合、ノズルにおいて、気流を発生させるためには、2つの振動系(図1-2 空気槽A、B)が必要である。これは、数式モデル化するときに非常に多くの未知数を生み出すが、動的特性がわかれば、共振効果により効率を高めることも可能である。水弁単体の整流機能、エネルギー損失等については、参考文献¹⁾により報告した。本論文では、これらの結果をふまえて、水弁がケーソンに組み込まれた場合の整流機能の検証、および動的特性を実験的に明かにするとともに最適条件を考察し、また、数式モデルを提案し、数値計算により現象をどの程度表わすことができるかを検討するものである。

2. 実験装置 および 実験条件

ケーソンモデルとして、図2-1に示すものを10mm厚アクリル板を使って作製した。ケーソンに組み込まれた水弁の整流効果、およびノズルにおいて1方向流が発生していることを確かめるため、空気室、空気槽A、Bでの圧力を計測し、振動系が機能していることを確認するため、それぞれの水位を計測した。また、振動系との共振現象を明かにするため、空気槽A、Bの水深を12cm~18cmと変化させ、それぞれのケースについて、

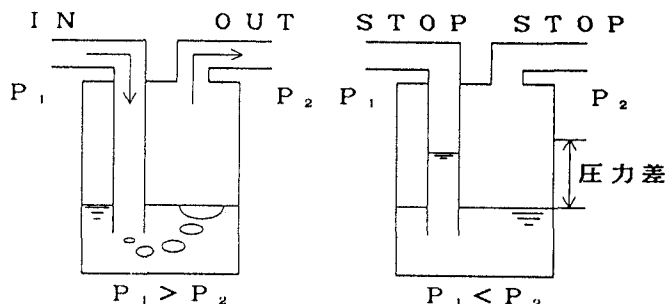


図1-1 水弁による整流

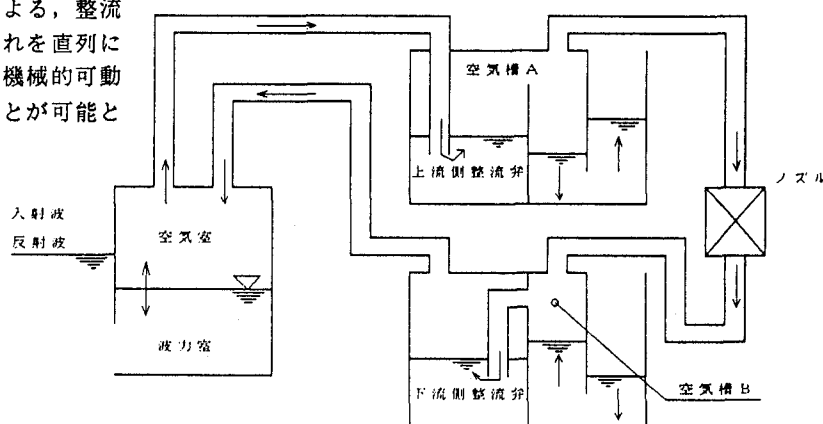


図1-2 波力発電システム概念図

表2-1 実験条件

実験ケース	空気槽水深 (cm)	固有周期 (秒)	外力波周期 (秒)
J 1 A J 2 A J 3 A J 4 A J 5 A	12	0.53	1.80 1.63 1.19 1.01 0.83
J 6 A J 7 A J 8 A J 9 A	15	0.63	0.83 0.97 1.20 1.59
J 1 B J 2 B J 3 B J 4 B	18	0.68	1.58 1.20 1.01 0.86
J 1 C J 2 C J 3 C J 4 C	21	0.80	0.84 1.00 1.14 1.65

規則波の周期を変化させて実験をおこない（表2-1），ケーソン内での変換効率の変化を検討した．なお，模型の諸元は表2-2に示す通りである．

表 2 - 2 模型の諸元

模型外寸	35×35×57 cm
波力室開口部	10 cm (BH)
波力室水面面積	33×4.5=148.5 cm
外力静水深	22 cm
空気室体積	9414 cm
水井鉛直管水没深	上流側 0.5 cm 下流側 0.5 cm
水井室面積	130.5 cm
水井管径	0.26 cm
ノズル部導管径	0.26 cm
ノズル部開口径	0.08 cm
空気槽 A, B 水深	12~21 cm

3. 数式モデル化

密閉型であるため未知数がたいへん多くなるが，基本的には，波力空気室，空気槽 A, B を分離し，空気の流入質量が一定に保たれる条件を使って，各部を結びつける．

3. 1 波力室の運動，空気室の力学

図 3-1 に波力室，空気室の変量を示す．

波力室の運動

入射波に対する波力室の水面の運動は，spring-mass-dashpot-system でモデル化する．

$$\rho s L h (1 + C_H) \frac{d^2 \eta}{dt^2} + \rho s \nu C_r \frac{A_w d \eta}{L dt} + \rho s g L \eta = F_P - \rho g H_w L \quad (3.1)$$

ここに， ρ ：水の密度， s ：海水の比重， t ：時間， ν ：水の動粘性係数， C_H ：付加質量係数で，流体の加速度を水面変位 η で代表させた補正とケーソン前面での付加質量とを考慮すると，

$$C_H = L/2b - 1/2 + \pi b/4h$$

となる．系を自由振動させることにより C_H と C_r ：減衰項の係数，は実験的に求めることができるが，その結果によると， C_H は波力室奥部の死水域の影響でこれによる換算よりは，小さくなるようである．外力項の F_P は，ポテンシャル理論による外力圧で，入射波高 H_i ，反射率 K_r のとき，

$$F_P = \rho s \frac{H_i}{2} \frac{g}{k} \frac{\sinh kb}{\cosh kh} (1 + K_r) \cos \sigma t$$

として与える．

空気室の力学

ここでは，空気の質量保存，熱収支，気体の状態方程式，について考える．空気室内の体積変化（ V_w ）と水面変化（ η ）の関係は，次のようになる．

$$-A_w \eta = V_w \quad (3.2)$$

空気室内で空気の質量は保存されるため次の式が成り立つ．

$$\frac{d}{dt} (\rho_0 + \rho_w) (V_{w0} + V_w) = -M_A + M_E \quad (3.3)$$

熱量に関しては，大気の定積比熱を C_u ，定圧比熱を C_p とすると次の式が必要となる．

$$C_u \frac{d}{dt} (\rho_0 + \rho_w) (V_{w0} + V_w) (T_0 + T_w) = -\rho g (H_0 + H_w) \frac{dV_w}{dt} - M_A (T_0 + T_w) C_p + M_E (T_0 + T_E) C_p \quad (3.4)$$

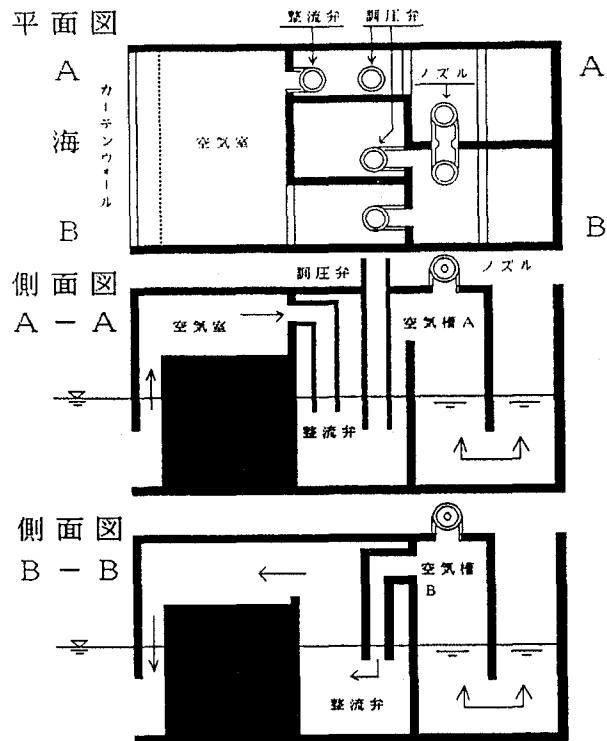


図 2 - 1 ケーソンモデル

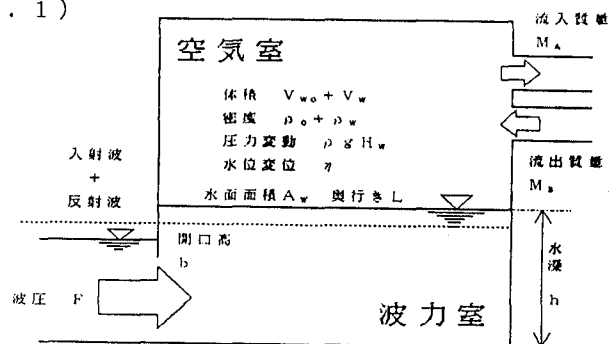


図 3 - 1 波力室，空気室の変量

左辺は空気室内の熱量の変化，右辺第1項は圧力のなす仕事，第2項は出て行く熱量，第3項は入ってくる熱量である．一方気体の状態方程式は，次のようになる． H_0 は大気圧の水頭値で10.3mである．

$$\rho g (H_0 + H_W) = R (T_0 + T_W) (\rho_0 + \rho_W) \quad (3.5)$$

3.2 空気槽A, Bの運動

図3-2に空気槽A, Bの変量を示す．空気槽A, Bについても，波力空気室と同様に考え，水面の運動に対しては次の式を考える．

$$C_A W_A \frac{d^2 \eta_A}{dt^2} + \rho S \nu C_{fA} B_A \frac{d \eta_A}{dt} + \rho S g (\eta_A A_{A1} + \eta_A \frac{A_{A1}}{A_{A0}} A_{A0}) = \rho g H_A A_{A1} \quad (3.6)$$

$$C_B W_B \frac{d^2 \eta_B}{dt^2} + \rho S \nu C_{fB} B_B \frac{d \eta_B}{dt} + \rho S g (\eta_B A_{B1} + \eta_B \frac{A_{B1}}{A_{B0}} A_{B0}) = \rho g H_B A_{B1} \quad (3.7)$$

空気槽内の体積変化量と，水面変位との関係は，

$$A_{A1} \eta_A = V_A \quad (3.8) \quad A_{B1} \eta_B = V_B \quad (3.9)$$

質量の連続は，

$$\frac{d}{dt} (\rho_0 + \rho_A) (V_{A0} + V_A) = M_A - M_N \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_0 + \rho_B) (V_{B0} + V_B) = -M_B + M_N \quad (3.11)$$

熱量に関しては，

$$\begin{aligned} C_U \frac{d}{dt} (\rho_0 + \rho_A) (V_{A0} + V_A) (T_0 + T_A) \\ = -\rho g (H_0 + H_A) \frac{dV_A}{dt} + M_A (T_0 + T_W) C_P - \\ M_N (T_0 + T_A) C_P \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} C_U \frac{d}{dt} (\rho_0 + \rho_B) (V_{B0} + V_B) (T_0 + T_B) \\ = -\rho g (H_0 + H_B) \frac{dV_B}{dt} - M_B (T_0 + T_W) C_P + \\ M_N (T_0 + T_B) C_P \end{aligned} \quad (3.13)$$

気体の状態方程式は，

$$\rho g (H_0 + H_A) = R (T_0 + T_A) (\rho_0 + \rho_A) \quad (3.14)$$

$$\rho g (H_0 + H_B) = R (T_0 + T_B) (\rho_0 + \rho_B) \quad (3.15)$$

となる．

3.3 水弁 (図3-3) ノズルを通過する流れ

水弁をはさむ圧力差は文献¹⁾の結果を用いて，以下のように計算する．

上流側水弁 (3.16)

$$H_W - H_A > H_{WA} \quad \text{なら}$$

$$H_W - H_A = H_{WA} + d_A f_U (u_A / \sqrt{2g d_A})$$

$$H_W - H_A < H_{WA} \quad \text{なら}$$

$$M_A = 0$$

下流側水弁

$$H_B - H_W > H_{WB} \quad \text{なら}$$

$$H_B - H_W = H_{WB} + d_B f_U (u_B / \sqrt{2g d_B})$$

$$H_B - H_W < H_{WB} \quad \text{なら}$$

$$M_B = 0$$

ここに， u_A ， u_B は水弁管内を流れる空気の流れの質量流量， f_U は次のように定義されるエネルギー損失の関数である．

$$f_U(X) = 0.015 X^{1.6} \quad \text{for } X \geq 9.6; \quad f_U(X) = 0.08 X^{0.5} \quad \text{for } X < 9.6$$

ノズル前後の圧力水頭差と流速水頭の2乗との間には，線形関係があるので，流速を空気の流れの質量流速に直した次の形の式を用いる．

$$M_N = \rho_0 A_N C_N \sqrt{2g (H_A - H_B)}$$

ここに， A_N ：ノズル開口面積， C_N ：実験により求めた流量係数である．

以上より，方程式が18本，未知数が18個となり解析が可能となる．なお，計算は中央差分によって行なうものとする．

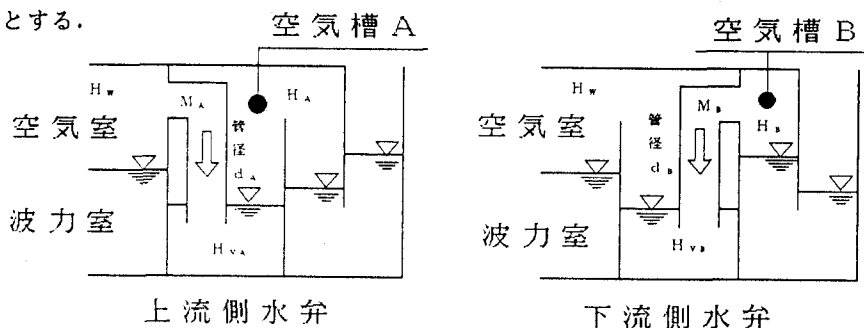


図3-3
水弁の変量

4. 実験結果, 計算結果 および 考察

4. 1 実験による水弁の整流機能の検証

ケーソンに組み込まれた水弁が振動気流を整流していることは、図4-1、図4-2から確認できる。上流側（図4-1）では、図のハッチングした部分は、 $H_w - H_A > H_{0A}$ で、空気室の圧力が空気槽Aの圧力より水弁の鉛直管水没深を越えて大きいことを示している。下流側（図4-2）では、 $H_w - H_B < H_{0B}$ であり、いずれも、この部分でのみ空気が流れている。

ノズルにおいて1方向に空気が流れていることは、図4-3から確かめることができる。図中でノズル前後の圧力は、空気槽A、空気槽Bで、ノズルをはさんで常に圧力差があることから、空気は途絶えることなく流れていることになる。

4. 2 実験値と計算値の比較

図4-1から図4-8に外力波条件が同じ場合の実験値と計算値を比較した。3節で提案した数式モデルは、差分法による計算が可能であり、外力波条件にもよるが、時間ステップ1/600秒ぐらいで収束する。このモデルにより、外力波に対するおおまかな内部応答は計算できる。以下留意点を記す。

外力波の位相に対する、水位変動、圧力変動の位相遅れは、ほぼ実験値と同様に表わすことができる。これは、ケーソン内の空気の圧縮性を考えたこと、振動系の水の慣性項の評価が妥当であったためであろう。

外力波圧に対する、内部の圧力変動、水位変動の値がかなり大きい。原因としては、波圧をポテンシャル理論で与えたこと、波力室開口部での損失が C_H 、 C_T だけでは表わしきれないこと、さらに、熱量に関する式、気体の状態方程式に損失係数がないこと、などが考えられる。

圧力に関して、実験値では外力波の10分の1周期のオーダの圧力変動が重なっているが、計算値では、6分の1程度となっている。計算での振動は式(3.1)において、空気室の圧力水頭(H_w)が、波力室の水面変動(η)にたいする復元項として働くため、この程度の固有周期を持つと推察される。実験値の振動は、現段階ではよくわからないが、水弁を空気流が流れる際に生じる泡が、原因の1つとなっているようである。水弁による空気流の振動は、このモデルでは表現し得ないが、今後ケーソンの動的特性に大きな影響を与えることがわかれば、水弁を流れる空気流速と、それに伴う振動との関係を明かにし計算に組み込まなければならないであろう。

後述の振動系との動的特性は、実験値、計算値とも、同じ傾向を示す。すなわち、外力波周期に対して効率がよくなるような共振現象をさぐるには、計算だけでもかなり評価できるということになる。

4. 3 振動系に対する動的特性

外力波のパワーをどれほど変換できるかということは重要な問題であり、これを決定するパラメータは、種々考えられる。参考文献¹⁾⁴⁾などでは、水弁の鉛直管水没深、水弁の管径と弁室内面積との比（ノズル比）などによる効率の変化を報告しているが、ここでは、外力波周期に対する振動系の共振により、効率がどの程度変化するかについて考察する。

図4-9から図4-12は、横軸に外力周期を固有周期で無次元化し、縦軸に、ノズルで発生するエネルギーをケーソン前面から流入するエネルギーで割って効率を計算した図である。ノズルでのエネルギーは、ノズルを流れる空気流質量と前後の圧力差の積で、流入エネルギーは、ケーソン前面にかかる波圧と前面を通過する水の平均流速との積から求めた。また、図4-9から図4-12では空気槽A、Bの体積がだんだん小さくなっている。

いずれの場合においても、外力波周期が固有周期に近づくにつれて効率が高くなっており、その変化の割合は40%にも及ぶ。共振現象を起こして効率を高めることは、かなり有効な手段であろう。

データを回帰させた直線を見ると、効率上昇の割合は、空気槽の体積が小さいほど大きい。しかし、共振周期から離れたところでは、逆に空気槽の体積が小さい方が効率がよい。これは、空気槽の体積が大きいと内部の圧力が上昇しにくく、小さいと空気が流れにくい、という性格によるものと考えられる。実験条件、実験データともに少なく、決定はできないが、空気槽の体積も効率を変化させる要因の1つであると考えられる。

实验值

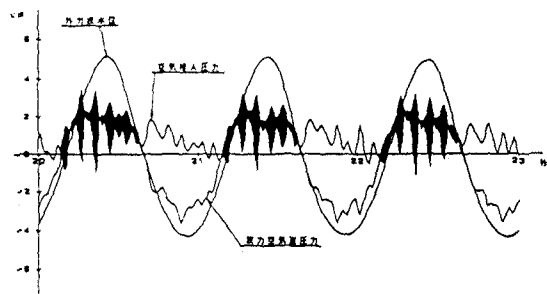


图 4-1 外力波水位，波力空气室压力，空气槽 A 压力

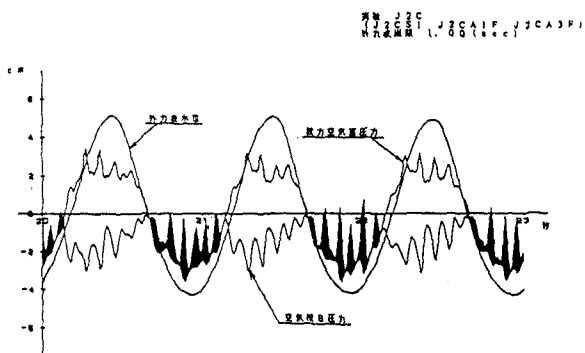


图 4-2 外力波水位，波力空气室压力，空气槽 B 压力

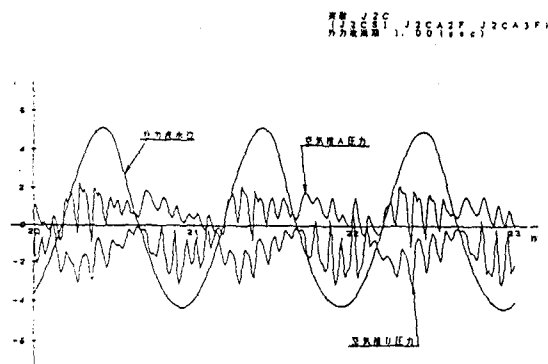


图 4-3 外力波水位，空气槽 A 压力，空气槽 B 压力

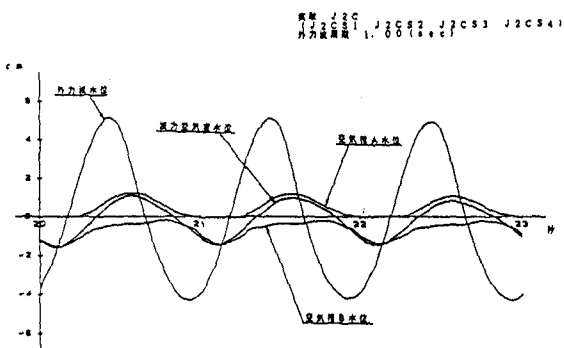


图 4-4 外力波水位，波力空气室水位，空气槽 A 水位，空气槽 B 水位

计算值

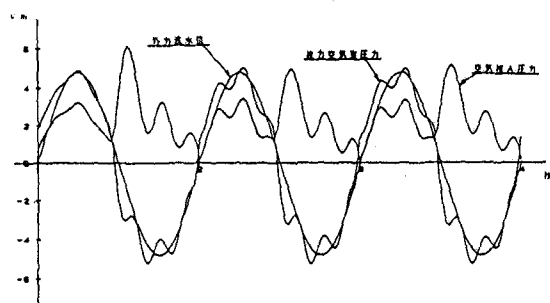


图 4-5 外力波水位，波力空气室压力，空气槽 A 压力

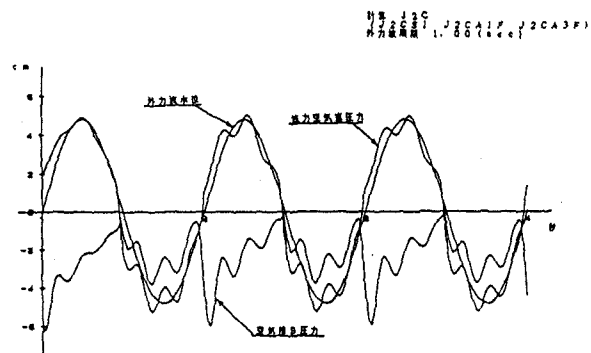


图 4-6 外力波水位，波力空气室压力，空气槽 B 压力

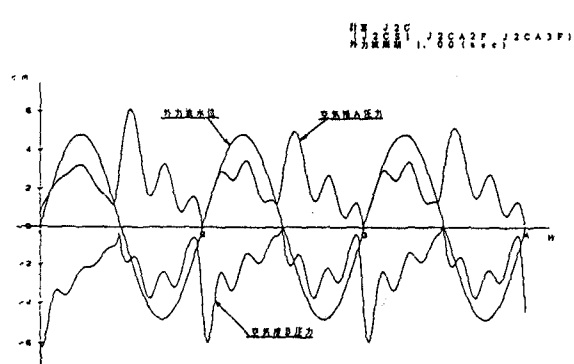


图 4-7 外力波水位，空气槽 A 压力，空气槽 B 压力

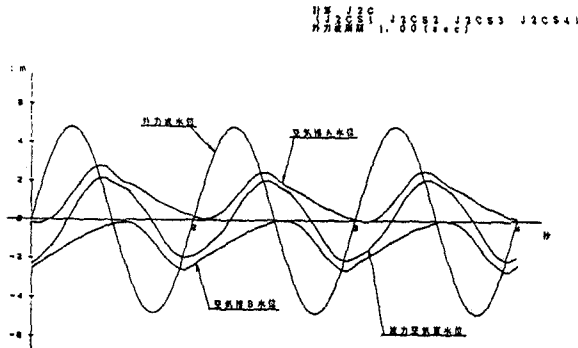
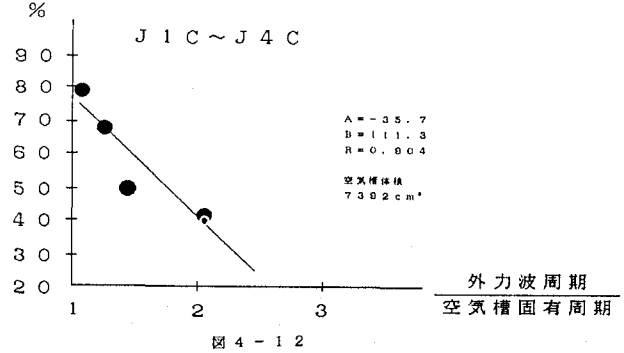
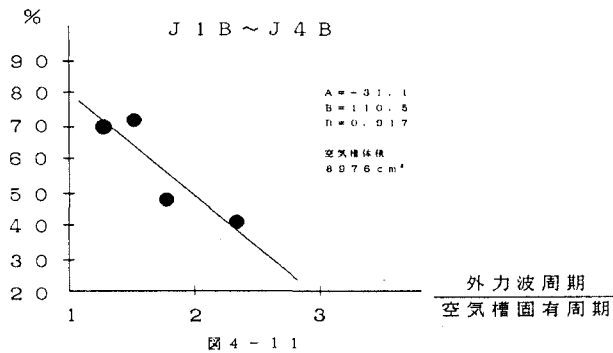
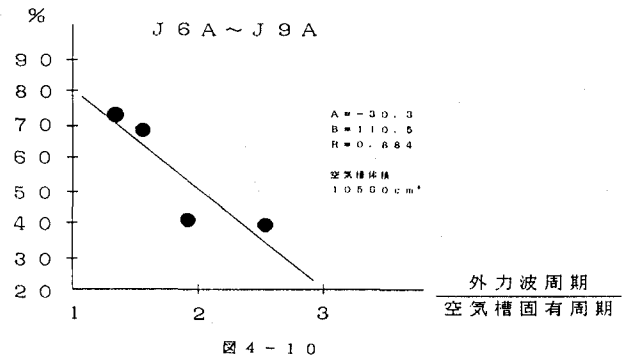
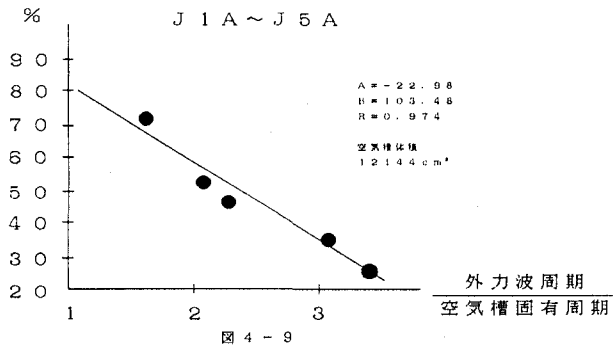


图 4-8 外力波水位，波力空气室水位，空气槽 A 水位，空气槽 B 水位



5. おわりに

今回検討した効率は、ケーソン内に取り込まれたエネルギーについてであり、最大約80%もの効率を示す。しかし、外力波のエネルギーをケーソン内に取り込む段階でのロスが大きく、その吸収率は、20%程度にとどまる。波力発電ケーソンとしてより有効なものとするには、波力室の形状などを工夫することが必要である。

数値計算については、まだ初期の段階なので多くの問題も含まれる。しかし、効率については、実験値と同じ傾向を示すこと、多くの形状パラメータを含むこと、などから、計算による最適システムの模索も可能と思われる。また、この論文では波力空気室が1つで、水弁が1組の single-caisson-type であるが、多数の波力空気室を持つ multi-caisson-type に対しても、この計算方法は若干の修正を要するだけで、適用できるはずである。

6. 参考文献

- 1) 沢本正樹・首藤伸夫・渡辺国也・新島洋明：水弁を通過する空気流のエネルギー損失，土木学会論文集，第375号／II-6，PP. 329-332，1986。
- 2) 田中重人・沢本正樹：水弁を用いた波力発電ケーソンの基礎的研究，東北支部技術研究発表会講演概要，PP. 146-147，1987。
- 3) 田中重人・沢本正樹：密閉型波力発電ケーソンの数値モデル化，東北支部技術研究発表会講演概要，PP. 171-172，1988。
- 4) 渡部國也・菊池省悟・小宮俊夫・小林正典・中川寛之：密閉サイクル波力発電システムに関する水理模型実験，第2回波浪エネルギー利用シンポジウム講演概要，PP. 43-49，1987。