

振動水柱型波力発電装置の空気出力に関する基礎的研究

—projecting wall 付固定空気室—

堀田 平*・宮崎武晃*・鷺尾幸久**・竹内俊介***

1. 概 要

沿岸に打ち寄せる波のエネルギーを利用する発電システムの中で、振動水柱型空気タービン方式波力発電装置が、メカニズムの簡便さなどから近年実用化へ向けて着目されてきている。とりわけ、昭和58年7月に山形県鶴岡市三瀬立岩地区の岸礁に設置された沿岸固定式波力発電装置は、この型式の実機装置として運転されており、今後の発展が期待されている。

この装置のメカニズムは、空気室内の海水（水柱）が入射して来る波により振動を励起され、これにより空気室内の空気が空気室上面に設けられたノズルから流入・流出し、ノズルの上の空気タービンを回転させて発電するというものである¹⁾。

振動水柱型沿岸固定式波力発電装置に関しては、流洋産業研究会²⁾および東大生研³⁾などで行われているが、これらは水底を考慮した空気室の二次元問題として取り扱っており、一方、Ambli⁴⁾、Evans⁵⁾らは空気室前面に発生する定在波に着目して空気室の前方両側面に鉛直壁（projecting wall）を取り付けた時の現象について、主に理論的に検討している。

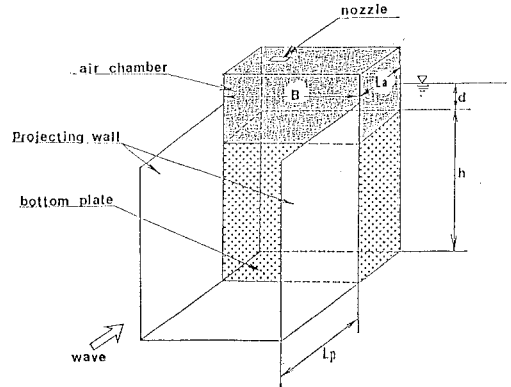
そこで本報告においては、projecting wall 付固定空気室がかなり広い範囲の周期の波に対して波エネルギー吸収効率が高いことに着目し、そのメカニズムを明らかにし、また、実海域に設置する空気室の最適設計を念頭に置いて、波エネルギー吸収効率の推定を行う簡易手法を提案し、定性的・定量的検討を行う。

なお、本報告では入射波を深海波とし、従って固定空気室の底面と水底面との距離は十分にあるとする。

2. projecting wall 付固定空気室

2.1 装置の概要

図—1に projecting wall 付固定空気室の概要を示す。図中、空気室（air chamber）は深さ d だけ没水した底の無い箱であり、上面にノズル孔が設けられている。ま

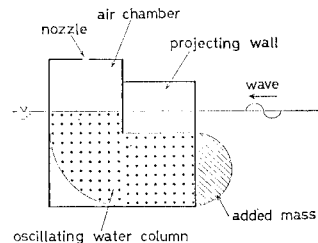


図—1 projecting wall 付固定空気室

た底板（bottom plate）は、開口高さ h だけ波入射方向に開口している。一方、projecting wall は空気室の両側面前方に突き出た鉛直壁であり、この高さは $(h+d)$ より十分高く、空気室前面に生じる定在波がこれを越えて側方に流出しないとする。なお、projecting wall と空気室前面で囲まれた部分を harbour とも称する⁴⁾。

2.2 水柱の運動

高井ら⁶⁾によれば、波浪中において越波しない程度に没水した平行な2平板間の水は、平板間距離が没水深さに比べて小さい時、この部分を水柱とみなして等価浮体と称し、浮体の波浪中挙動と同様に解くことができるとしている。一方、底板が付いた状態についても、波浪の無透過型（非対称型）空気室において、池淵⁷⁾は同様な取り扱いができるとしている。従って、本報においても、空気室内水面から projecting wall 先端までの水を図—2に示す様な曲がった水柱として、この運動を解く。



図—2 固定空気室内振動水柱

* 正会員 工修 海洋科学技術センター 海洋利用技術部

** 海洋科学技術センター 海洋利用技術部

*** 室蘭工業大学土木工学科研究生

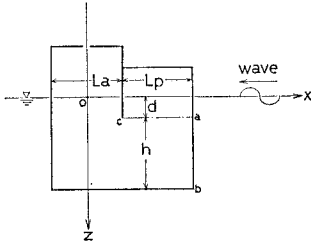


図-3 固定空気室の記号および座標系

いま空気室内水柱の上下運動に着目し、座標系を図-3 の様にとると、水柱の運動方程式は次式で表わされる。

$$(M+m)\ddot{z} + N \cdot \dot{z} + D \cdot z + \rho g A_w \cdot z = F_w \quad (1)$$

ここで、

- M : 水柱質量
- m : 付加質量
- N : 造波減衰力係数
- D : ノズル負荷係数
- ρ : 水の密度
- g : 重力加速度
- A_w : 空気室内水線面積
- F_w : 波強制力

M, m, N および F_w の各項は本報の目的の一つである空気室の簡易設計を考慮して、次の様に取り扱う。

i) 水柱質量 M : 図-2 中の点打部とする。即ち水柱質量を

$$M = \rho \cdot B [L_a \cdot d + \pi/4 \cdot \{(L_a + h)/2\}^2 + h \cdot L_p] \quad (2)$$

とする。ここで、

- B : 空気室幅
- d : 空気室没水
- L_a : 空気室長さ
- h : 底板開口高さ
- L_p : projecting wall 長さ

ii) 付加質量 m : 水柱と共に振動する水の質量、すなわち付加質量は厳密には周波数に依存する値ではあるが、ここでは計算の簡易化のため次式の値で一定として扱う。

$$m = \rho \cdot B \cdot \pi/2 \cdot (h/2)^2 \quad (3)$$

iii) 造波減衰力係数 N : これも領域分割法などによって求めるべきであるが、造渦・粘性による影響も含めて、底板無し空気室について得られる値⁸⁾を用いる。

iv) ノズル負荷係数: 実機においては、タービン・発電機による負荷であるが、本報ではノズルにより負荷として、水柱振動速度の二乗に比例する値、すなわち非線形負荷⁹⁾とする。

v) 波強制力 F_w : 振動水柱が受ける波力は、図-3 において a—b 面に水平に及ぼす成分と、a—c 面に鉛直

に及ぼす成分を考慮する。いま、振幅 h_a の正弦波が空気室に入射するとした時、波強制力 F_w を

$$F_w = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (4)$$

とする。 F_1, F_2, F_3 は a—b 面に及ぼす波力の慣性項、減衰項、静圧項であり、 F_4 は a—c 面に及ぼす静圧項である。ここで各項は次式にて表わされる。

$$F_1 = -\rho \cdot h_a \cdot B \cdot \omega^2 \cdot m \cdot c_1 \cdot \cos(\omega t + kx_p - \pi/2) \quad (5)$$

ここで、

- ω : 角周波数
- k : 波数 ($=\omega^2/g$)
- $c_1 = e^{-k(d+h/2)}$
- $x_p = L_a/2 + L_p$

$$F_2 = -\rho \cdot h_a \cdot B \cdot \omega \cdot N \cdot c_1 \cdot \sin(\omega t + kx_p - \pi/2) \quad (6)$$

$$F_3 = \rho \cdot g \cdot h_a \int_a^{d+h} e^{-kz} \cos(\omega t + kx_p - \pi/2) dz \quad (7)$$

$$F_4 = \rho \cdot g \cdot h_a \cdot L_b \cdot B \cdot \cos(\omega t + kx_h) \quad (8)$$

ここで、

$$x_h = (L_a + L_p)/2$$

以上で得られた各値を用いて式 (1) を解く。ただし式 (1) は非線形微分方程式であるため、本報では数値積分法 (Newmark- β 法) を用いて解く。

2.3 空気室前面での定在波

図-4 に示す様に空気室前面の projecting wall 長さの 4 倍になる時に “harbour resonant” と呼ばれる空気室内水柱の共振現象が顕著となる。つまり、周期 T_w 、波長 λ の正弦波が入射するとき、harbour resonant は、

$$L_p = \lambda/4 = g/2\pi \cdot T_w^2/4 \quad (9)$$

となる時に peak を呈し、従って、この時の周期 T_H は、

$$T_H = \sqrt{8\pi/g \cdot L_p} \quad (10)$$

として表わされる。

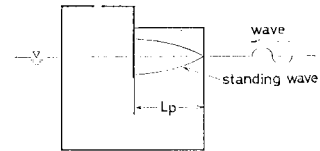


図-4 harbour resonant

3. 実験および計算結果

実験は海洋科学技術センター波動水槽 (長さ 40 m, 幅 4 m, 水深 2 m) の中央部に、 $L_a = 40$ cm, $B = 40$ cm の固定空気室に、 $h = 40$ cm の底板および $L_p = 40$ cm の projecting wall を取り付け、開口方向から波高 5 cm, 周期 0.8~3 秒の規則波を入射させ、入射波高 H_w , 空気室内水位変動両振幅 H_i および空気室内圧力変動 p_i を計測した¹⁰⁾。また、空気室上面には円孔 (ノズル) が

設けてある。なお、本報告においてはノズル比 $[s \cdot c / A_w]$ (s : ノズル面積, c : 縮流係数) が $1/80$ および $1/6$ の場合について述べる。

解析は次の項目について行った。

- a) 空気室内波高比: H_i/H_w
- b) 空気室内比圧力: $2p_a/H_w$
 p_a : 空気室内圧力変動片振幅
- c) 波エネルギー吸収効率: η
 $\eta = 100(P_w/E_w) (\%)$

$$P_w = \sqrt{2\rho_a \cdot s \cdot c \cdot \sum_{i=1}^n |p_i|^2} / n \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots (11)$$

$$n = T_w / \Delta t \quad (\Delta t: \text{計算刻み時間})$$

$$E_w = \rho g^2 / 32\pi \cdot H_w^2 \cdot T_w \cdot B$$

なお、 ρ_a は空気密度であり、また数値計算には当センターの VAX/VMS を用いた。

3.1 底板付固定空気室

projecting wall の存在による影響を調べるため、図-1 に示した空気室より projecting wall 部を取りはずした空気室について実験および計算を行った。図-5 に底板の有無による内部波高比への影響を示す。図中に示す計算値は、底板付のとき $L_p = 0$ 、一方板なしのときには、

$$M = \rho g B L_a d \quad \dots\dots (12)$$

として求めた値である。

空気室の没水深さ d および底板の開口高さ h の空気室内比圧力へ与える影響を図-6 および 図-7 に示す。

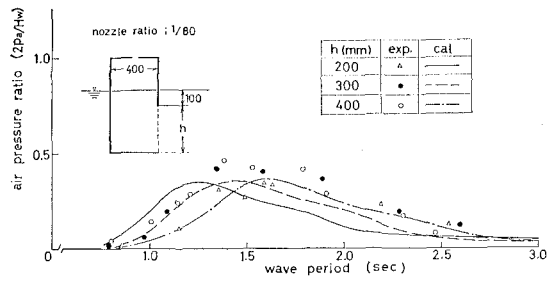


図-7 底板付固定空気室開口高さ影響

3.2 projecting wall 付固定空気室

i) projecting wall 内水平 cover 付

projecting wall を取り付けしたことによる水柱長さの増大のみによる影響を調べるため、projecting wall 内の没水深さ d の水深に wall 先端まで水平板を設けた状態で実験および計算を行った。これにより harbour resonant は発生せず、水柱は明らかに 図-2 に示した形状となる。なお、波強制力は cover なしの状態とは当然異なり、従って数値計算においては式(4)中の F_4 を 0 とする。

内部波高比特性を図-8 に、空気室没水深さの空気室内比圧力へ与える影響を図-9 に示す。

ii) projecting wall 内水平 cover なし

図-1 に示す projecting wall 付固定空気室の本来の形状のモデルについて、空気室内比圧特性を図-10 に、波エネルギー吸収効率性を図-11 に示す。なお、各図

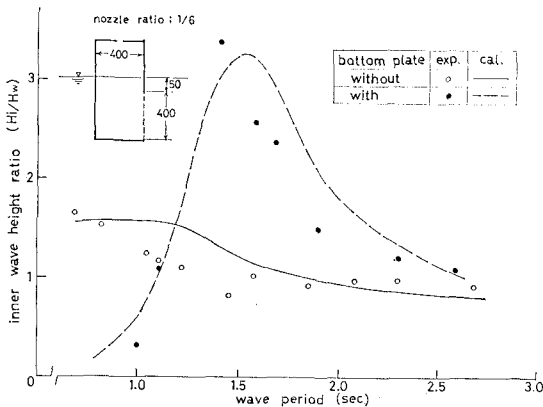


図-5 底板付固定空気室内波高特性

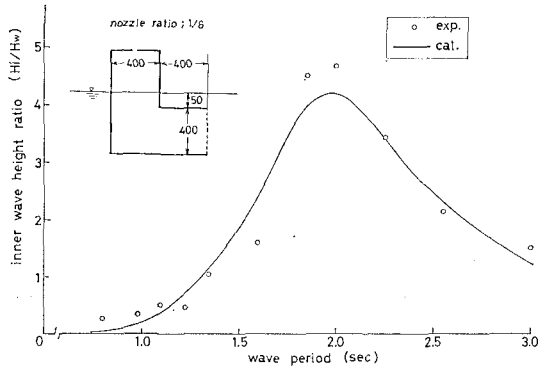


図-8 空気室内波高特性 (水平 cover 付)

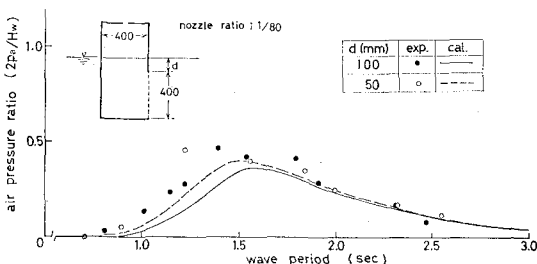


図-6 底板付固定空気室没水深影響

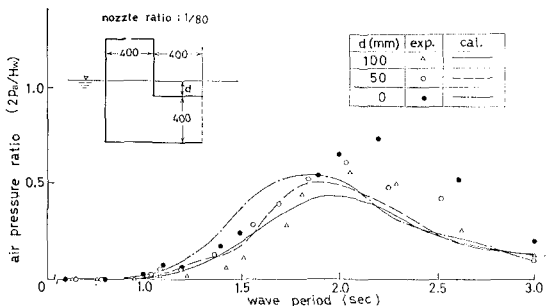


図-9 没水深影響 (水平 cover 付)

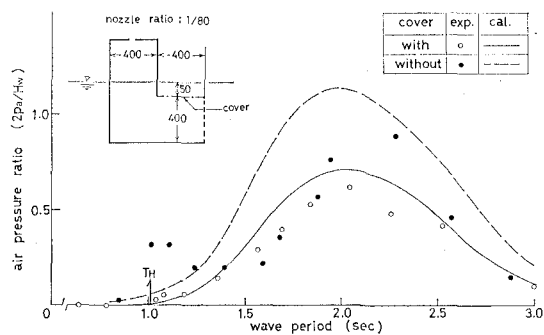


図-10 比圧力特性

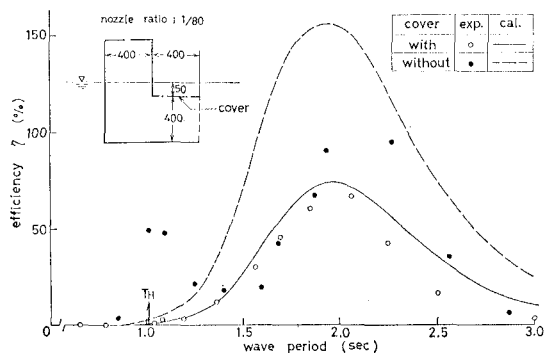


図-11 波エネルギー吸収効率特性

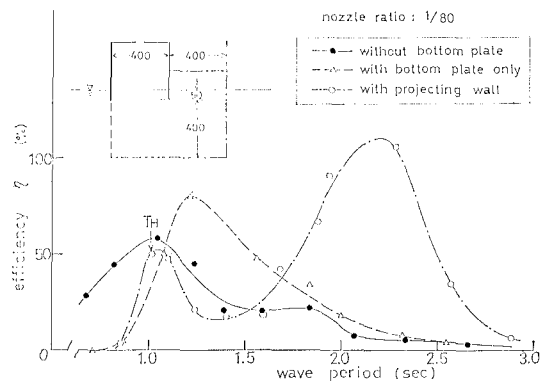


図-12 固定空気室の波エネルギー吸収効率(実験値)

中の T_H は式 (10) にて求めた harbour resonant の周期である。

図-12 に固定空気室に底板を、さらに projecting wall を取り付けた実験での波エネルギー吸収率特性を示す。図中の曲線は実験値をフェアリングした線である。

4. 考 察

4.1 底板付固定空気室

底板のついていない固定空気室まで含めて空気室内部波高比および比圧力の計算値は実験値にほぼ定性的、定量的に合っており、本報告で提案する簡易計算法、すな

わち水柱の簡便な見積りが、projecting wall 長さをゼロとしたこの形状にも十分有効であった。

しかし、図-7 において、底板の開口高さによる出力への影響の傾向が計算結果の傾向とは必ずしも合ってはおらず、今後の検討課題である。

4.2 projecting wall 付固定空気室

projecting wall 内に水平 cover を取り付け、水柱を明確にし、また harbour resonant を消した状態では、空気室内部波高比、比圧力ともに計算値は実験値によく合っており、水柱運動のメカニズムが明らかにされたが、水平 cover の無い、すなわち本来の projecting wall 付固定空気室については、出力の peak 周期がほぼ合っており半定量的には推定できるとは言え、計算値は実験値に比べかなり大きくなっている。これは、空気室前板下部で生じる渦の影響および水柱に及ぼす波強制力の推定誤差などに因ると考えられる。

一方、harbour resonant については、その出現周期は容易に求められ、実験値とも一致した。

総じて、projecting wall 付固定空気室の波エネルギー吸収効率については定性的にほぼ明らかにされ、各部寸法等諸元の算定が容易となったが、定量的については今後の課題として残されている。

5. 結 言

振動水柱型波力発電装置の固定空気室に projecting wall を取り付けた際の波エネルギー吸収率について、底板なし、底板付き、水平 cover 付きとも比較して実験を行い、空気室設計のための空気出力の簡易計算方法を提案し、両者の結果を比較した。主な結言としては、

- (1) projecting wall を取り付けることにより、従来の底板付空気室より空気出力の peak 値を向上させ、またその出現周期を長周期側にする。
- (2) この型式の空気室における水柱形状が把握でき、その振動メカニズムがほぼ解明された。
- (3) 振動水柱および水柱に及ぼす波強制力の簡易な推定の手法が得られ、また harbour resonant による peak 値の出現周期も容易に求められ、空気室設計のための一つの提案が行えた。

参 考 文 献

- 1) 堀田 平・宮崎武晃・竹内俊介: 固定空気室による波浪発電の出力向上の研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, II-103, 1983.
- 2) 海洋産業研究会: 沿岸波エネルギー利用システム開発研究報告書, 1981.
- 3) 前田久明・木下 健・増田光一・林 秀郎・加藤 渉: 波浪発電に関する基礎的研究(その5), 日本造船学会論文集, 第152号, pp. 250~255, 1983.
- 4) Ambli, N., K. Bönke, O. Malmo and A. Reitan: The kvaerner multiresonant OWC, The 2nd International

- Symposium on Wave Energy Utilization, pp. 275~295, 1982.
- 5) Evans, D. V.: Wave-power absorption within a resonant harbour, The 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization, pp. 371~378, 1982.
 - 6) 高井忠夫・山本 茂・一色 浩・根角幸明: 2枚の垂直板間の水柱の運動と透過波について, 関西造船協会誌, 第164号, pp. 43~49, 1977.
 - 7) 池淵哲郎: 空気式波浪発電装置のエネルギー吸収効率について, 日本造船学会第6回海洋工学シンポジウム, pp. 153~161, 1982.
 - 8) 田才福三: 規則波中の応答理論および計算法, 日本造船学会耐航生に関するシンポジウム, pp. 1~52, 1976.
 - 9) 宮崎武晃・横溝宏典・堀田 平・鷺尾幸久: 波浪発電出力向上のための空気流位相制御の基礎的研究(その1), 関西造船協会誌, 第188号, pp. 1~8, 1983.
 - 10) 竹内俊介: 波浪発電装置の空気出力向上に関する基礎研究, 東海大学海洋学部卒業論文, 1983.
-