

緊張係留浮体による波力発電システムに関する研究

田中良弘*・古川圭三**・元良勇太郎***

1. はじめに

著者ら(1989)は、以前より、図-1に示すような波エネルギーを吸収する緊張係留型浮体の動揺、エネルギー吸収効率および緊張係留力の変動等に関して研究を実施してきた。これはダブル振動水柱(D.O.W.C)の原理を利用し、前後の空気室で広い周期帯の波エネルギーを効率よく吸収しようとするものである。これまで、2次元水槽における各種水理実験および2次元数値解析モデルによるパラメトリックスタディを行い、発電浮体の2次元での諸特性がほぼ明らかになった。

本研究は、まず、理論解析において、空気室内の水位変動面における境界条件の改善を行った。次に、波エネルギー吸収効率の最適化を図る目的で、空気室の形状を改良した構造に対して、数値解析および2次元水理実験による検証を行った。また、実際の海域に適用する場合の総合的な特性を把握するために、平面水槽を用いた3次元水理実験を実施した。従来、浮消波堤列まわりの平面的な波浪変形やその波浪動揺変位の特性に関する研究はほとんどなく、わずかに中村ら(1992)の研究が挙げられる。そこで、今回の実験により、発電浮体群の配列の違いによる、その背後の静穏度特性、波エネルギー吸収効率特性等を解明し、波力発電システムとしての適用性を検討するものである。

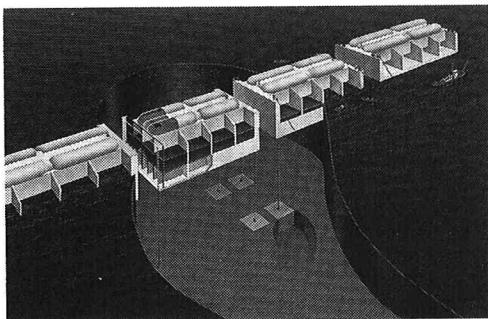


図-1 緊張係留による発電浮体システム

2. 波エネルギー吸収効率の最適化

2.1 理論解析

図-2に示すように、緊張係留された波力発電浮体に対し、振幅 ζ_a 、角周波数 ω の微小振幅波が入射すると考える。流体運動を、非圧縮性完全流体の非回転運動と仮定し、仮想境界AB、A'B'に囲まれた領域内を解析領域とする。浮体の空気室は薄肉部材を含むため、仮想境界CD、C'D'を設け、解析領域を3分割する。以上の仮定から、流体域では次の形の速度ポテンシャルが存在する。

$$\phi(x, z, t) = \phi(x, z) \cdot \exp(i\omega t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

関数 $\phi(x, z)$ は各領域でLaplaceの式を満足する。

$$\nabla^2 \phi_j = 0; \quad j=1, 2^\pm \quad \dots\dots\dots (2)$$

浮体は係留されているので、Swayのみの調和運動を考えると、運動方程式は次式で与えられる。

$$M\ddot{X} + KX = -i\omega\rho \int_{S_2} \phi_j e^{i\omega t} n_x ds; \quad j=1, 2^\pm \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 M は浮体の質量、 K は水平方向の係留バネ、 n_x は浮体に対して内向き法線方向と x 軸とのなす角の方向余弦を示す。

境界 $S_{2\pm}$ における境界条件は、空気室の振動水面における力学的および運動学的条件により与えられる。小島ら(1983)は、空気を理想気体と見なし、外気を含めた系においてエネルギー保存式、質量保存式、状態方程式を基礎方程式として、圧力変動の近似解を得ている。空気室内の水位変動 η および圧力変動 P をそれぞれ式(4)、(5)で表すと、境界 $S_{2\pm}$ 上での力学的境界条件は

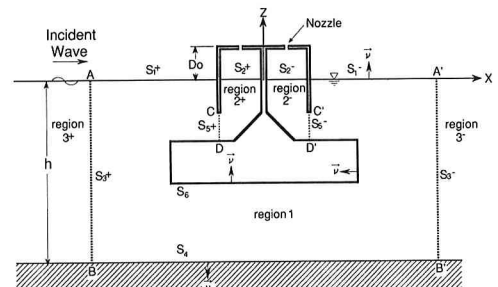


図-2 座標系と流体領域の定義

* 正会員 Ph.D. 大成建設(株) 土木設計第一部 第二設計室室長

** 正会員 工修 大成建設(株) 技術開発部 海洋開発室

*** 大成建設(株) 技術開発部 海洋開発室

式(6)で与えられる。

$$\eta(t) = \eta_a \cdot \exp(i\omega t) \dots\dots\dots (4)$$

$$P(t) = \beta(\eta_a) \cdot \eta(t) \dots\dots\dots (5)$$

$$\partial \Phi_{2z} / \partial t = -\beta \eta / \rho - g \eta \dots\dots\dots (6)$$

ここに η_a および β は複素係数であり、 β は空気室内の圧力変動と水位変動の位相情報を含み、収束計算により求める必要がある。

また、運動学的境界条件は次式で与えられる。

$$\partial \Phi_{2z} / \partial z = \partial \eta / \partial t \dots\dots\dots (7)$$

式(6)と(7)より、境界条件は次式の様になる。

$$\frac{\partial \phi_{2z}}{\partial \nu} = -\frac{\omega^2 \rho}{\beta + \rho g} \phi_{2z} \quad \text{on } S_{2z} \dots\dots\dots (8)$$

この境界条件を用い、速度ポテンシャルを Green の第2 式を適用して得られる積分方程式により数値解析する。

2.2 模型実験による理論検証

実験に用いた改良型模型は図-3 に示すように、中央壁下端を斜板としたもの (R 型) である。従来型 (T 型) に比べ改良型は、波の空気室への流入をスムーズにすることにより、エネルギー吸収効率の向上を狙ったものである。

実験は実海域で水深 50 m と想定し、縮尺 1/40 とした。実験パラメータとしては、ノズル比を $\epsilon = 1/100, 1/150, 1/200$ 、入射波高を $H_w = 5 \text{ cm}, 12.5 \text{ cm}$ とし、周期を $T = 0.790 \sim 2.372$ 秒とした。供試模型はアクリル製に鉛ウエイトを付けたもので、幅 100 cm、長さ 78 cm、高さ 72.5 cm である。測定項目としては、波高、空気室内の水位と空気圧、係留索張力、浮体表面の水圧、および浮体動揺量である。

2.3 解析・実験結果の考察

図-4、5 に R 型浮体の解析および実験結果を T 型浮体の実験結果と合わせて示す。

図-4 は波高 5 cm の場合の前後室の波エネルギー吸収効率 (EFF) の合計値と入射波の波長 λ を浮体の空気室幅 B で除した無次元波長 (λ/B) との関係を示したものである。T 型の実験値が、ノズル比の変化により大きく変動しているのに対して、R 型ではその変動割合が小さ

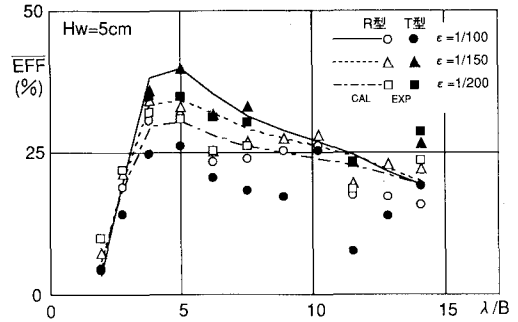


図-4 2 次元波エネルギー吸収効率 (前後室合計)

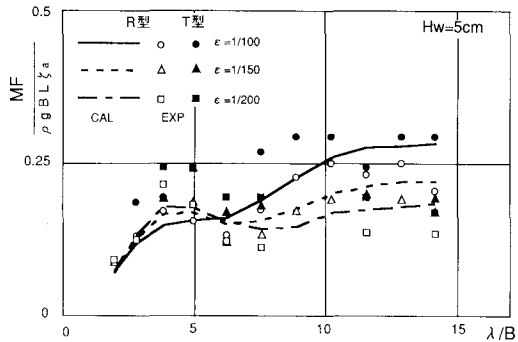


図-5 係留索の変動張力 (入射波側)

く、3 種類のノズル比の結果は同様の値を示している。R 型の理論値は、全周波数帯で実験値に良く一致している。

図-5 は浮体前側の係留索変動張力を示したものである。R 型の張力は長周期域で T 型の結果より大幅に小さくなっており、後側の張力も同様に長周期域で低減されている。理論値は長周期で実験値と若干の差が見られるが、比較的一致している。なお、理論値では T 型と R 型とで顕著な差は見られなかった。

3. 発電システムの検討

3.1 実験方法

実海域での発電システムの総合特性を明らかにするために、平面水槽において 3 次元模型実験を行った。実験内容は、単独浮体の斜め入射実験および複数の発電浮体に対する総合実験である。

(1) 単独浮体の斜め入射実験

図-3 に示す発電浮体 (T 型) 1 基を、平面水槽中央に緊張係留し、係留用アンカーを兼ねたターンテーブルを回転させて、波の入射角度 χ を $0 \sim 45^\circ$ の範囲で 15° ピッチに変化させた。模型縮尺を 1/40 とし、入射波は 2 次元実験と同様のものを用いた。

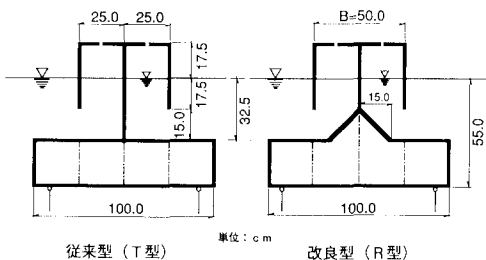


図-3 実験模型 (従来型と改良型)

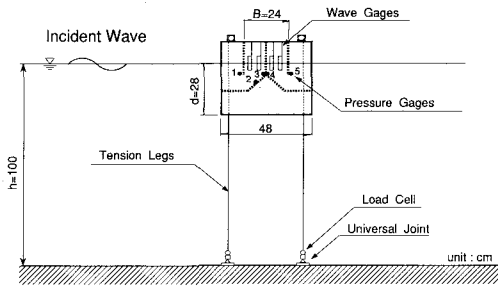


図-6 発電浮体模型（3次元実験）

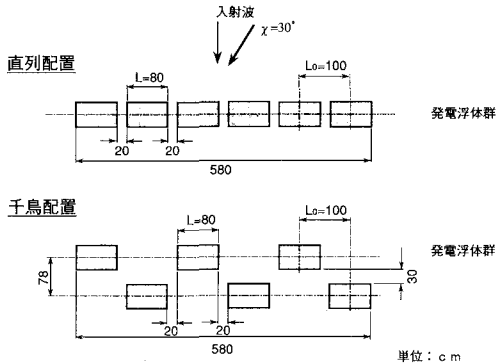


図-7 発電浮体の配置

(2) 複数浮体の総合実験

本実験は、発電浮体を複数個配置した場合に創出される背後の静穏度および浮体の相互干渉による波エネルギー吸収効率等の諸特性を明らかにする目的で行った。

実験は、縮尺 1/50 とし、図-6 に示す緊張係留された発電浮体 6 基を、図-7 に示すように直列と千鳥に配置し、それぞれの配置に対して、波を直角および 30° 方向から作用させた。入射波高は 4, 10 および 20 cm, 周期は 0.848~1.980 秒（実機換算で $H_w'=2, 5, 10$ m, $T_w'=6\sim14$ 秒）とした。複数浮体の実験では、実海域での水深は 50 m と 2 次元実験と同じ想定であるが、発電浮体の断面寸法は 2 次元浮体模型から 40% 縮小したものである。6 基の浮体のうち中央付近の 1~2 基を各種センサーを取り付けた計測用浮体とし、背後では図-8 に示す 50 cm 間隔の合計 70 点で波高分布を計測した。

3.2 実験結果の考察

(1) 波入射角度のエネルギー吸収効率への影響

図-9 に入射波高 2 m 相当の実験時の波エネルギー吸収効率（前後室の合計）を示す。波の入射角の影響は顕著で、入射角が大きくなるほど、吸収効率が大きくなる傾向がある。これは、浮体前後に張り出している空気室の仕切壁（Projection wall）による集波効果によるものと考えられる。

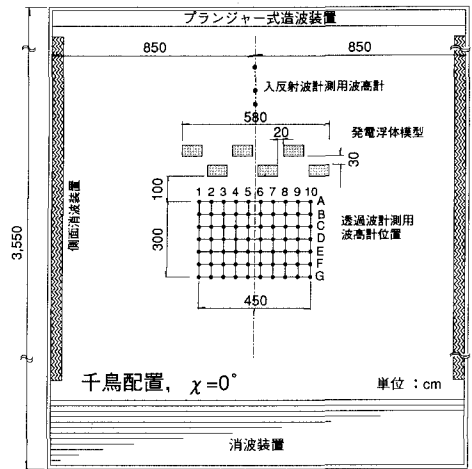


図-8 発電浮体群背後の波高計測点

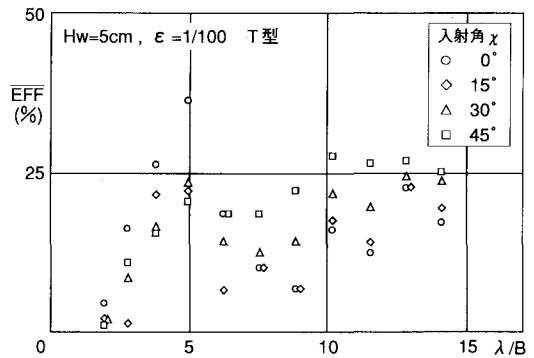


図-9 3次元単独浮体（T型）の波エネルギー吸収効率

(2) 浮体群背後の静穏度

浮体群背後の 70 個の計測点における波高を入射波高との波高比で表し、図-10~13 にその実験結果の一例を示す。図-10, 11 は直列および千鳥配置に対する直角入射の場合の結果である。直列配置では、背後の波高比は、およそ 50~60% であり、広い範囲で波高比コンター線の変動が少なく、一様な分布を示している。これに対して千鳥配置では、極小値が約 40% と直列配置より低減しているものの、40~70% と変動が大きく、コンターに起伏が多く見られる。ただし、波の周期が長くなるにつれて、配置の違いによるこのような傾向は顕著ではなくなり、どちらの配置でも、背後で一様な分布を示す。このことは Dalrymple ら (1990) の研究における、浮体間隔 L_0 と入射波の波長 λ との比、つまり L_0/λ が 1 よりも増々 0 に近づくことを意味する。その場合、浮体と浮体との開口部からの透過波は、斜波成分にならず、進行波のみになる。

図-12, 13 は入射角 30° の結果を示す。直列配置では、

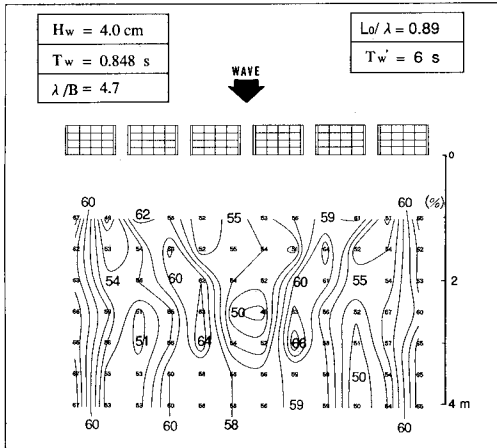


図-10 浮体群背後の波高分布1 (直列配置)

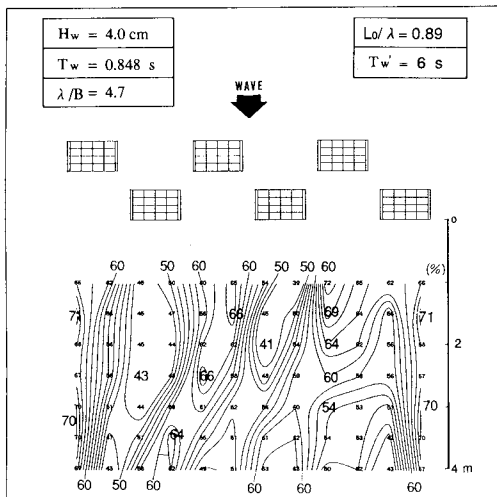


図-11 浮体群背後の波高分布2 (千鳥配置)

中央付近の比較的大い範囲で20%以下に低減されており、回折波の影響を直接受ける右側を除いて、全体的に50%以下の値を示している。千鳥配置では極小値が部分的に30%以下となっているものの、浮体開口部背後では60%以上の値を示している。これは、中村ら(1992)が述べているように、波の入射方向から見て、開口部を遮断するような浮体配置が背後の静穏度確保のためには必要であることを裏づけている。

(3) 波エネルギー吸収効率の特性

図-14, 15に直角入射の場合のエネルギー吸収効率(前後室合計値)の実験値を示す。直列配置では、短周期域で35%程度で、 $\lambda/B > 8$ では、一様に、50%前後の効率を示し、周期には依存しない。一方、図-15は千鳥配置の沖側の浮体の結果であるが、周期による効率の変動が激しく、入射波周期への顕著な依存性を示している。

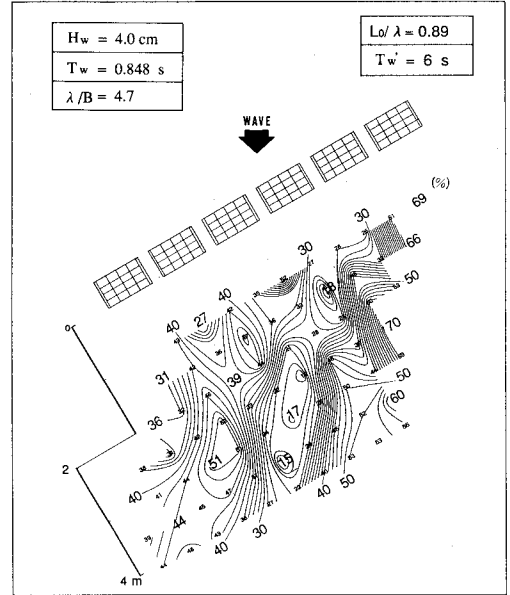


図-12 浮体群背後の波高分布3 (直列配置)

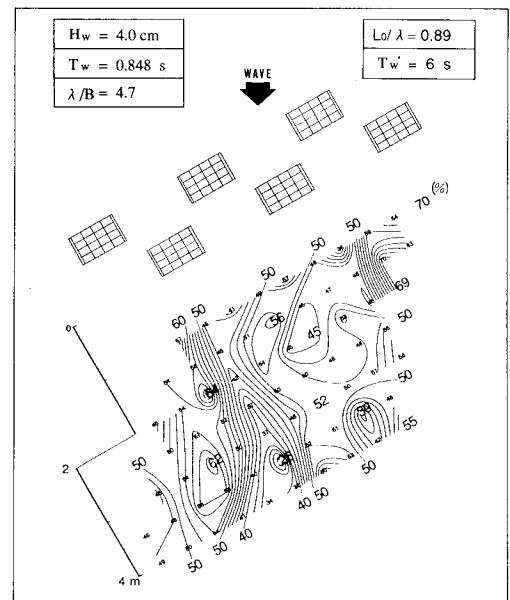


図-13 浮体群背後の波高分布4 (千鳥配置)

また、同じケースの陸側の浮体では、異なった傾向を示し、浮体相互の干渉による影響が顕著に表れている。いずれの配置においても、効率は最大50%程度で、2次元実験の35%と比べ、かなり大きく、有効な3次元集波効果が認められる。

(4) 係留索変動張力

図-16に直列配置の場合の各係留索の変動張力の結

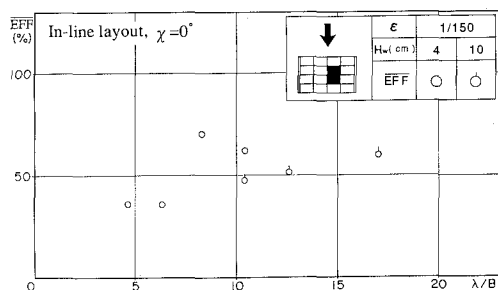


図-14 波エネルギー吸収効率 (直列配置)

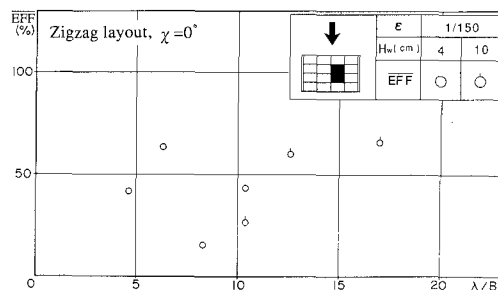


図-15 波エネルギー吸収効率 (千鳥配置—入射波側)

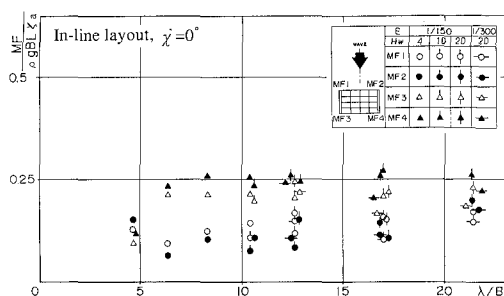


図-16 係留索変動張力 (直列配置)

果を示す。変動張力は2次元実験の結果よりかなり小さく、特に陸側(MF3, 4)の張力は、2次元実験のT型では、無次元値でおよそ0.35であったのが、3次元の複数浮体(R型)実験では最大0.25程度とかなり低減している。その理由としては、T型からR型への改良、さらに、2次元から3次元での浮体の吃水が40%減少したことによるものと考えられる。

4. 結 論

緊張係留によるDOWC型波力発電浮体の2次元実

験、理論解析および複数浮体を配置した3次元実験を通して、以下の特性が明らかになった。

(1) 空気室内の水位変動面における境界条件として、新たに水位変動と空気室内圧力との位相情報を取り入れたものにより、計算精度の向上が図れる。

(2) 中央壁下部を鉛直壁から斜板に改良することで、ノズル比の違いによる波エネルギー吸収効率の変動を抑え、ノズル比によらず安定した効率が得られる。また、係留索変動張力が長周期域で20~30%減少する。

(3) 波入射角に関しては、入射角が45°まで、その角度が大きくなる程、比較的長周期の入射波に対して、吸収効率が増加し、周期依存性が無くなる傾向にある。これは、浮体前後に張り出している空気室のProjection wallによる集波効果によるものと考えられる。

(4) 発電浮体群背後の静穏度に関しては、入射波に対して開口部を作らない直列配置の場合、広い範囲で一樣な静穏度を保つが、千鳥配置では、開口部の影響で、特に短周期波に対して変動の大きい波高分布を示す。ただし、開口部が波長に対して小さくなるにつれて($L_0/\lambda \ll 1$)、背後の静穏度は直列配置と同様に良好である。

(5) 発電浮体群の波エネルギー吸収効率は最大約50%と2次元実験の結果より大きく、3次元的な集波効果が認められる。また、係留索の変動張力も3次元実験の方が小さくなり、設計的に有利である。

最後に、本研究は、(社)日本海洋開発産業協会が日本小型自動車振興会の補助事業として行った研究開発の一部であり、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 小島明史・合田良実・鈴木諭司(1983): 波力発電ケーソンの空気出力効率の解析, 港湾技研報告, 第22巻, 第3号, pp. 125-158.
- 田中良弘・元良勇太郎・古川圭三・中村孝明(1989): 緊張係留浮体による波力発電装置に関する理論と実験, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 769-773.
- 中村孝幸・野村周吾・泉川学文・森田知志(1992): 浮防波堤の平面的な配置法に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 531-535.
- Dalrymple, R. A. and Martin, P. A. (1990): Wave Diffraction through Offshore Breakwaters, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 727-741.