

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360369

研究課題名(和文)大規模発電を目的とした沖合Wave farmに関する研究

研究課題名(英文)Studies on the offshore wave farm of wave energy converters for large-scale power generation

研究代表者

永田 修一(NAGATA, Shuichi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授

研究者番号：30404205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,300,000円、(間接経費) 2,190,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来装置より、格段に小型で、小さい係留力、高効率という優れた特性を持つ浮体式振動水柱型波力発電装置"後ろ曲げダクトブイ(Backward Bent Duct Buoy, 以後BBDB)を構成単位とした沖合の大規模Wave farm建設を目指し、そのために必要な要素技術を開発した。BBDBを対象に、不規則な波浪中における浮体運動、空気室内の空気圧力変動、空気タービン特性、発電機特性、係留系特性を同時に考慮できる新しい最適設計手法を開発した。この設計手法の検証と装置の性能把握のために、模型に関する水槽実験を行った。

研究成果の概要(英文)：A method is developed to design a wave farm that consists of many backward bent duct buoy (BBDB). First, in order to design a model with higher conversion efficiency, preliminary 2D and 3D tank tests to evaluate the primary conversion efficiency of three kinds of small scale models with orifice load are performed. Secondly, a medium scale model mounted the impulse turbine with guide vanes and generator is made. This medium scale model is the scale-up model of the model which has excellent performance in small scale model tests. From the 3D tank tests in regular waves to evaluate generating efficiency of this model, it is found that the BBDB mounted impulse turbine with guide vanes has high generating efficiency. Finally numerical method is developed to design a hydrodynamic force, motion of floating body and primary conversion efficiency of BBDB. The numerical result is validated using by experimental data.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：BBDB 波力発電 一次変換効率 wave farm

1. 研究開始当初の背景

我が国での波力発電開発については、過去において、台風等の異常波浪下で、より安全な形式とされる振動水柱型装置についての研究が主に行われ、海岸固定式の波力発電ケーソンや、“マイティーホエール”等の浮体型の波力発電装置の開発が行われたが、これらの装置の発電効率は 0.12~0.17 程度と低く、発電単価も高いために、実用化には至っていない。現在、発電単価 40 円/kWh を目指した NEDO プロジェクトでは、海岸固定式の波力発電ケーソンや Power Buoy の改良型やジャイロ式装置を開発中であるが、発電効率、耐久性、最適制御等の課題克服の困難さから、目標の発電単価の実現には、まだまだ時間がかかりそうである。

申請者らは、これまでの課題を解決する波力発電システムとして、浮体式振動水柱型波力発電装置“後ろ曲げダクトブイ：BBDB”を対象に、現在、実用化研究を実施中である。これまでに行った実験的な研究から、BBDB は、“マイティーホエール”のような従来型 OWC 装置に比べると、小型で、係留力も小さくでき、高い発電効率を有する等、優れた特性を持つことがわかっている。

本研究では、申請者らのこれまでの研究を更に進め、この浮体式振動水柱型波力発電装置 BBDB をさらに高性能化するとともに、BBDB を構成単位とした沖合の大規模 Wave farm 建設を目指して、そのために必要な数値解析技術、最適設計技術を開発する。また、装置の性能把握と解析法の検証のための水槽実験も併せて行う。

2. 研究の目的

本研究では、従来装置より、格段に小型で、小さい係留力、高効率という優れた特性を持つ浮体式振動水柱型波力発電装置“後ろ曲げダクトブイ (Backward Bent Duct Buoy、以後 BBDB) を構成単位とした沖合の大規模 Wave farm 建設を目指し、そのために必要な要素技術を開発する。

まず、BBDB 単体を対象に、以下の実験を行い BBDB の一次変換効率 (波パワーから空気パワーへの変換効率) 特性及び発電特性を把握する。

空気タービンをオリフィス負荷とした小型モデルを製作し、これを係留し、2 次元、3 次元の波浪中実験を行い、一次変換効率を計測して、浮体形状や波周期が一次変換効率に及ぼす影響を調べる。

次に、佐賀大学と松江高専とで開発した案内羽根付衝動タービンを搭載した中型 BBDB モデルを製作し、これをワイヤーで 3 次元水槽に係留して波浪中実験を行い、波周期が発電特性に及ぼす影響を調べる。この中型 BBDB を実海域に設置して、多方向不規則波浪中での中型 BBDB の発電実験を行う。

次に、波の峰方向に多数の BBDB を設置した Wave farm を想定して、3 次元水槽で 2 基の小型 BBDB を波の峰に平行に配置した時の波浪中実験を行い、2 基の模型の平行配置間距離が 2 基の BBDB の一次変換効率に及ぼす影響について調べる。

さらに、不規則な波浪中における浮体運動、空気室内の空気圧力変動、空気タービン特性、発電機特性、係留系特性を同時に考慮できる新しい最適設計手法の開発を目指す。このために、以下を実施する。

BBDB の波浪中での一次変換特性を評価できる計算法を開発する。

MPS 法に基づいて、大波浪中の BBDB の挙動を評価する計算プログラムを作成する。

渦の消散に基づくエネルギーロスを考慮するために 2 次元渦法に基づいた浮体運動計算法を開発する。

佐賀大学と松江高専とで開発した衝動型空気タービンのタービン性能特性実験データを考慮して、不規則な波浪中における浮体運動、空気室内の空気圧力変動、空気タービン特性、発電機特性、係留系特性を同時に考慮できる新しい最適設計手法を示す。

3. 研究の方法

(1) BBDB の一次変換効率に関する水槽実験

二次元および三次元水槽における規則波実験で小型 BBDB モデルの一次変換効率 (波パワーから空気パワーへの変換効率) を計測した。

二次元実験は佐賀大学海洋エネルギー研究センター伊万里サテライトに設置された水槽で実施した。水槽は長さ 18m、幅 0.8m および水深 1m であり、両端に吸収式造波機をもつ。実験で使用した小型 BBDB モデルの寸法は長さ 0.8m、幅 0.78m、高さ 0.6m である。また、船体形状が一次変換効率に及ぼす影響を評価するため、タイプ A のダクトを 15cm 延長したタイプ B、45cm 延長したタイプ C を用いて実験を実施した。モデルはアルミニウム製フレームと透明アクリル板から構成される。空気室天井の中心に直径 40mm のオリフィスをもつ。オリフィス径は固定型振動水柱型波力発電装置の実験結果を基に、オリフィス断面積が空気室断面積の 1/100 になるよう決定した。空気室には内部波高を計測するため天井に超音波波高計 2 式、空気室内部圧力を計測するために圧力計を設置した。水槽端に設置された造波機で波高 5cm、一定周期の規則波を発生させ、規則波中における BBDB の空気室内部波高および内部圧力から一次変換効率を算出した。同時に MVTEC 社製ビデオトラッキングシステム HALCON を用い BBDB の運動を計測した。

また、三次元実験は九州大学応用力学研究所の深海機器実験水槽で実施した。実験には、二次元実験で最も一次変換効率が高い小型

模型タイプ A を用いて、一次変換効率を計測した。二次元実験と同様な計測器を用いて、入射波、空気室内の空気圧力と内部水面変位、浮体の動揺等を計測した。入射波は片振幅 2.5cm とした。

(2) 案内羽付衝動タービン搭載中型模型の水槽実験

一次変換効率が最も高い小型 BBDB 模型タイプ A の幾何学寸法を 3 倍にスケールアップした中型 BBDB 模型を製作した。模型寸法は長さ 2.5m、幅 2.3m、高さ 1.7m、喫水 1.1m である。この模型はアルミニウムのフレームおよび外殻から構成される。ダクト内部のフレーム間は発泡スチロールを取付けて平滑化した。ただし、パラスト配置が制限されるため、中型模型の慣性モーメントは小型模型と完全な相似模型とはなっていない。

中型模型に案内羽根付き衝動タービンおよび発電機を搭載した。この空気タービンは佐賀大学と松江高専で開発されたもので、従来のウェルズタービンに比べ、失速も生じず、広い流量範囲で高い変換効率（空気パワーからタービンパワーへの変換効率）を有するものである。別途行われている定常流中タービン単独試験で、タービン翼枚数、ロータや案内羽根の角度等様々なタービンパラメータを変化させた時に、最も良い性能を示すタービンを用いている。発電機には、スカイ電子製発電機 SKY-HR160 を用いた。SKY-HR160 は定格出力 100W、最大出力 160W の風力発電用発電機で、出力は三相交流出力である。

実験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽（長さ 65m、幅 5m、水深 7m）の中央に中型 BBDB 模型を係留し、規則波中における一次変換効率および発電電力の特性を計測した。波力発電による出力に関して、発電機からの三相交流出力を直流に変換し、その後、850 オームの電気抵抗 R に印加し、一定負荷運転状態で計測した。通常時、出力 P_{out} は V^2/R から求めた。また、発電効率と運動の関係を調べた。

(3) 案内羽付衝動タービン搭載中型模型の実海域実験

(2) で使用した案内羽付衝動タービンを搭載した BBDB 中型模型を博多湾能古島沖 100m の海域に 2 週間設置し、発電実験を実施した。実験を行う海域は、用いる BBDB の全長が 2.5m のため波長が 10m 以上の波長の波では発電が期待できないこと、BBDB の乾舷は 0.7m 程度しかなく大波では波を被る可能性があることから、水深が 10m 以下で短波長の波が期待できること、内海ではあるが適度な波があることという条件を満たす必要がある。そこで、本実験では実験海域を福岡市西区能古島の東岸にある海水浴場沖とした。この海域は、博多湾は湾口が北西方面に開いているため玄海灘からのうねりが期待できること、水深が 7m 程度と浅いことなどから選定した。

(4) 規則波中での一次変換性能評価計算プログラムの開発

BBDB の特徴として、浮体と水室内の水柱の共鳴時には空気圧力が非常に高くなることや、装置自体が小型で浅い海でも使用可能であること、波浪中で波の入射方向に微速前進することなどが挙げられる。本項目では BBDB の最適形状を求めるための数値計算コードを開発した。

二次元計算法では、流体部においては境界要素法を用いて、流体の速度ポテンシャルを求める。浮体の運動については Surge, Heave, Pitch の 3 モード運動についての運動方程式から運動変化を求める。空気室の空気については圧縮性流体として、状態方程式、質量保存則、エネルギー保存則から圧力変動を求める。

(5) MPS 法に基づいて、大波浪中の BBDB の 2 次元挙動を評価する計算プログラムを作成し、BBDB に作用する波漂流力を計算した。

(6) 渦の消散に基づくエネルギーロスを考慮できる 2 次元渦法に基づいて浮体の運動を求める時系列計算法を開発する。渦度方程式の計算には渦度方程式は、Fractional step 法を用いて、Convection step と Diffusion step の 2 つの式に分離する。Convection step には複素係数の境界要素法を用いる。Convection step では、Core-Spreading 法を用いて、渦度の拡散を計算する。

4. 研究成果

(1) BBDB の一次変換効率に関する水槽実験

二次元および三次元水槽実験を行い、様々な形状の BBDB の一次変換性能を調査した。BBDB の小型模型（長さ 0.85m、幅 0.8m）の浮体形状を変化させた時の一次変換効率に関する水槽実験を行い、浮体形状が一変変換性能に及ぼす影響について明らかにした。二次元実験において、一次変換効率の最大値は約 70%であった。同じ模型に対して、九州大学の大型水槽で 3 次元実験を行い、一次変換効率の最大値が 90%を超えることを示した。一次変換効率は最大で 90%以上を示した。これは三次元による回折影響によるものと考えられる。また、一次変換効率最大時の模型運動の特徴を明確にとらえることができた。

(2) BBDB の発電実験

研究分担者が開発した案内羽付衝動タービンを搭載した長さ 2.5m、幅 2.29m の中型 BBDB 模型の発電実験を、九州大学の大型水槽で行い、発電効率の最大値が約 30%となることを示した。

(3) BBDB の実海域実験

上記(2)に用いた BBDB 模型を、博多湾の能古島沖 100m の海域に、ワイヤー係留方式で

設置して、2 週間の実証実験を行い、約 50cm の波高時に、最大 155W の出力を得た。最大発電量は有義波高 0.5m の時に、160W 程度であった。また、最高発電効率は 8.4%であった。本研究で採用した 3 点係留では、波向きに対して装置が正対せず、発電効率が著しく低下する場合がある。実用化に際しては、装置が波向きに受動的に正対し、なおかつ安全な係留方法を採用する必要があることが分かった。

(4) 規則波中での一次変換性能評価計算プログラムの開発

波浪中の BBDB の 2 次元運動と空気室内の空気の挙動を考慮できる規則波中での一次変換性能評価計算プログラムを作成し、実験結果との比較を行うことにより、その有効性を示した。また、空気室内の内部水面の境界条件にレーリーダンピングを考慮した 3 次元 BBDB の流体力計算プログラム作成し、対応する計算結果と実験結果が良く一致することを確認した。

(5) MPS 法に基づいて、大波浪中の BBDB の挙動を評価する計算プログラムを作成して、BBDB に働く漂流力を計算した。計算の結果、実験において現れる、特定の周波数帯を持つ入射波に対して、BBDB の負の漂流力が発生するという現象を計算においても再現できることを確認した。

(6) 2 次元渦法に基づいて、波浪中で浮体運動を求める時系列計算法を開発した。具体的な計算は、矩形断面、三角形断面をもつ 2 次元係留浮体の波浪中運動を計算した。浮体運動に関する計算結果と実験結果の比較から、流体中の渦の消散を考慮した渦法による浮体運動計算では、渦の消散を考慮しないポテンシャル計算ではうまく予測できない浮体運動の共振周波数における浮体運動を、より正確に予測できることが分かった。

(7) 佐賀大学と松江高専とで開発した衝動型空気タービンのタービン性能特性実験データを考慮して、不規則な波浪中における浮体運動、空気室内の空気圧力変動、空気タービン特性、発電機特性、係留系特性を同時に考慮できる新しい時系列計算式を示した。従来示されていなかった空気室内圧力の周波数解をベースにして畳み込み積分によって時系列の計算を行う方法を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

大窪慈生、永田修一、今井康貴、豊田和隆、新里英幸：渦法による浮体構造物の非線形波浪中挙動解析法の開発、日

本船舶海洋工学会論文集、査読有、第 16 号、2012、49-58

Y. Imai, K. Toyota, S. Nagata: Research on a Method Decreasing Motions and Drift Force of a Floating Renewable Energy Facility in Waves, Proc. of the 9th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, 査読有、2011、122-126

永田修一、豊田和隆、今井康貴、瀬戸口俊明、中川寛之：浮体式振動水柱型波力発電装置の一次変換性能評価法の開発、(第 1 報 周波数領域での 2 次元問題解析法) 日本船舶海洋工学論文集、査読有、第 14 号、2011、123-133

Y. Imai, K. Toyota, S. Nagata, T. Setoguchi, M. Takao: An Experimental Study on Generating Efficiency of a Wave Energy Converter “Backward bent Duct Buoy”, Proc. of 9th European Wave and Tidal Energy Conference, 査読有、2011

K. Toyota, S. Nagata, Y. Imai, J. Oda, T. Setoguchi : Primary Energy Conversion Characteristics of a Floating OWC “Backward Bent Duct Buoy”, 査読有、Proc. of the 20th ISOPE Conference, 2010、850-855

[学会発表](計 6 件)

P. Koirala, S. Nagata, Y. Imai, T. Murakami, T. Setoguchi, Numerical Study on Multi-chamber Fixed-Type Oscillating Wavter Columns, 第 24 回海洋工学シンポジウム、2014 年 3 月 15 日
大窪慈生、永田修一、今井康貴、新里英幸：自由表面をもつ流体と物体の干渉問題への渦法の適用、第 24 回海洋工学シンポジウム、OES24-086、2014 年 3 月 15 日

今井康貴、永田修一、村上天元、末吉紘太、浮体型波力発電装置「後ろ曲げダクトブイ」の一次変換効率への入射波方向影響に関する研究、平成 25 年度日本船舶海洋工学会秋季講演会、2013 年 11 月 22 日

永田修一、今井康貴、瀬戸口俊明、末吉紘太、浮体式振動水柱型波力発電装置「後ろ曲げダクトブイ」の一次変換に関する 2 次元周波数領域計算、第 18 回計算工学講演会、2013 年 6 月 19 日

M.A.H. Mamun, S. Nagata, K. Toyota, Y. Imai, T. Setoguchi: Analysis of Backward bent Duct Buoy by Moving Particle Semi-implicit Method, Int. Conf. on Mechanical, Industrial and Energy Engineering, MIE10-077, Khulna, Bangladesh, 2010 年 12 月 23 日

M.A.H. Mamun, S. Nagata, K. Toyota, Y. Imai, T. Setoguchi: Numerical

Simulation of Backward Bent Duct buoy
by Moving Particle Semi-implicit
Method, Proc. of the 13th Asian
Congress of Fluid Mechanics, Duaka,
Bangladesh, 2010年12月19日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

永田 修一 (NAGATA, Shuichi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授

研究者番号：30404205

(2)研究分担者

瀬戸口 俊明 (SETOGUCHI, Toshiaki)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授

研究者番号：90145186

今井 康貴 (IMAI, Yasutaka)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授

研究者番号：90284231

豊田 和隆 (TOYOTA, Kazutaka)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授

研究者番号：10274507

(3)連携研究者

なし