

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289337

研究課題名(和文) 沖合の大規模Wave farmの最適設計技術に関する研究

研究課題名(英文) Optimal design of large scale wave farm in offshore area

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) 9,600,000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(Oscillating Water Column: OWC)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、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、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。

研究成果の概要(英文)：Oscillating Water Column (OWC) type wave energy converter "Back bending duct buoy (BBDB) has superior properties of small size, small mooring force, high efficiency. In this research, we developed a new optimum design method that can consider floating motion in irregular waves, air pressure variation in air chamber, air turbine characteristics, mooring system characteristics at the same time. This technology contributes to a wave-energy farm consisting of many BBDBs.

研究分野：海洋工学

キーワード：海洋エネルギー 波力発電 渦法 振動水柱

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12%~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PowerBuoy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(Oscillating Water Column: OWC)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、そのために必要な以下の要素技術を開発する。

(1) 性能評価のための数値計算法の開発

a) システムシミュレーションの開発

波浪中における単一浮体の運動、空気室内の空気圧力の変動、空気タービンや係留系の非線形特性を同時に考慮して、浮体の運動、空気室内の空気圧力、タービンの角速度等を求めることができる時系列計算法(以下、システムシミュレーション)を作成する。浮体に働く流体力計算には、現在多用されている、流体の粘性と渦の影響を無視したポテンシャル理論を用いる。

b) 渦度を未知量とした性能解析手法の開発

入射波と水中ダクト内の振動水柱の共振時においては、浮体運動に伴って浮体端部から生じる渦の生成と拡散や、振動水柱の壁面摩擦による減衰等の流体の粘性に伴うダンピングが大きくなるため、これらを正確な評価無しには、装置からのエネル

ギー吸収量を正確に評価できないことを考慮して、波力発電装置の性能解析に適した2次元粘性流体解析法として、以下の2種類の解析法を開発する。

1) 渦積分方程式法

微分型表示の連続の式とNavier-Stokes方程式から導かれた、流速、渦度、圧力に関する3種類の積分方程式を厳密に、数値的に解く。3種類の式は、有限の流体領域を対象に、領域内と境界における、①流速を求めるBiot-Savartの式に相当する第1の積分方程式、②渦度を求める第2の積分方程式、③圧力、位置エネルギー及び運動エネルギーの和で表される総エネルギーに関する第3の積分方程式である。

2) 渦法

上記の3種類の積分方程式の内、第2の積分方程式を用いず、渦度に関する微分方程式を用いる実用計算法を開発する。これは渦法と呼ばれる方法に相当する。渦法は、現在、粘性流体解析法の一つとして、水中のタービンや空中の風車の性能解析等、機械工学分野等で多用されているが、水面波と浮体構造物の干渉問題への適用例は少なく、僅かに、2次元問題への適用があるのみである。Yeungら(2002)は、流れ関数と渦度を未知量とした粘性流体の基礎式を基に、渦度の粘性拡散の計算にRandom-Walk法を用いて、半没水鉛直板の強制2次元roll運動や小規模固定フィン付き浮体の2次元動揺を計算した。しかしながら、物体表面に働く流体圧力の計算には、完全流体の無渦運動の基礎式から得られる“拡張されたベルヌーイの式”を用いていたため、物体に働く流体力に関する計算値は、実験値と一致しない部分があった。本研究では、この方法をベースに発展させ、実用的な計算法にすることを目的とする。

(2) 水槽実験

振動水柱型装置の発電性能向上と開発予定の数値計算法の検証のために以下の造波水槽実験を行う。

a) BBDBに関する2次元実験

2次元造波水槽を用いて、空気タービンをオリフィス負荷と置き換えた小型BBDB模型の形状や慣動半径を変化させた実験を行い、一次変換効率に及ぼす影響を調べる。また、BBDBに働く漂流力に関する実験を行い、BBDBが波上側へ移動する現象(負の漂流力の発生)の原因について調べる。

b) 固定式の振動水柱型装置に関する実験

2次元造波水槽の端部に、カーテンウォール、空気室、空気タービン、発電機を備えた固定式の振動水柱型波力発電装置模型を製作し、入射波の周期や波高、空気室形状、タービン形状、発電機を変化

させ、それらが発電効率に及ぼす影響を調べる。これらの結果を浮体型装置の設計に生かす。

c) BBDB に関する 3 次元実験

3 次元造波水槽を用いて、空気タービン、発電機を搭載した単一の中型 BBDB 模型の重量分布の変化が発電性能に及ぼす影響や 2 基の小型 BBDB 模型を波の峰に平行に配置した時の 2 基の BBDB の一次変換効率等について調べる。

3. 研究の方法

(1) 性能評価のための数値計算法の開発

a) システムシミュレーションの開発

3 次元 BBDB の運動と空気室の時系列挙動を周波数領域の解をベースに畳み込み積分を用いて解く。計算では、浮体動揺によるメモリー影響だけでなく、従来示されていなかった空気室の空気圧力変動によるメモリー影響も含めた浮体の運動方程式、空気室内の水面変動量、空気室内の熱力学保存則、タービンの運動方程式、発電機特性を同時に考慮して、波力発電システム全体の性能評価が可能なシステムシミュレーション手法を作成する。周波数領域の計算として、浮体の 6 モードに関するラディエーション問題とディフラクション問題を、流体を非粘性の渦無し運動として扱うポテンシャル理論に基づいた 3 次元境界要素法を用いて解く。水深は無限水深とする。このラディエーション問題とディフラクション問題を解く際の空気室内の水面条件には、レーリーの仮想摩擦を導入して、入射波と空気室内水面変位の共振時に空気室内水面が過大になることを防ぐものとする。

空気室内の空気の挙動に関しては、空気を理想気体と考え、状態方程式、質量保存則、エネルギー保存則を用いる。空気タービンに関しては、別途実施済みの風洞実験結果から得られたトルク係数とタービン前後の空気圧力差に関する差圧係数を、空気室内空気の挙動とタービンの回転に関する運動方程式に入力する。

最終的に、3 次元 BBDB の 6 自由度運動、空気室内の空気圧力と温度、タービンの回転角速度の未知量に関して、同数の式が各時刻で得られるので、これを解いていく。

b) 渦度を未知量とした性能解析手法の開発

1) 渦積分方程式法

現在、粘性流体の解析は、微分型表示の連続の式と Navier-Stokes 方程式をベースに、これを差分法等の数値計算で解く方法が主流であるが、これらの計算手法では、物体表面からの渦の発生に関して難点があるように思われる。そこで、ここでは、微分型表示の連続の式と Navier-Stokes 方程式を積分型表示に変換した式を用い、物体表面位置での境界条件を境界積分方

式中で厳密に考慮する方法を考える。粘性流体の基礎式の積分型表示は、既に、Uhlman によって導かれているが、ここでは、まず、別の方法で誘導し、Uhlman の式とは異なる式も導く。この方法での未知量は、流速、渦度、流体圧力で、これらに関して 3 種類の積分方程式が得られる。すなわち、有限の流体領域を対象に、領域内と境界における、①流速を求める Biot-Savart の式に相当する第 1 の積分方程式、②渦度を求める第 2 の積分方程式、③圧力、位置エネルギー及び運動エネルギーの和で表される総エネルギーに関する第 3 の積分方程式である。ここでは、この計算手法の有効性を示すために、Rayleigh 流れ、振動平板上の粘性流れ等の一次元流れについて、計算法の有効性を確認する。

2) 渦法

3 種類の積分方程式の内、第 2 の積分方程式を用いず、渦度に関する微分方程式を用いる実用的計算法を開発し、2 次元 BBDB の一次変換性能計算に適用し、実験結果と比較することにより計算法の有効性を示す。計算では、2 次元流れを対象とするため、流れ関数と渦度を未知量とする。流れ関数の計算には、自由表面での境界条件を考慮して、複素速度ポテンシャルを導入する。渦モデルとしては、Blob モデルを考え、流速と渦度を未知量とする“渦度方程式”の解法には、Fractional step 法を用いて、時間方向の 1 ステップの計算を、前半の Convection step と後半の Diffusion step の 2 段階で計算する。前半の Convection step では、非回転速度ベクトルを求めるために、複素速度ポテンシャルに関する境界積分方程式を実数部と虚数部に分けた 2 種類の積分方程式に、非線形自由表面条件、水底条件、浮体表面条件、波の放射条件に対応する波の吸収条件を代入して解くことにより、時々刻々、移動する自由表面と浮体表面位置を追跡する。Diffusion step の計算では、渦度の粘性拡散の計算法として、2 次元拡散方程式の解析解をベースにして計算する Core-Spreading 法を考える。流体圧力の計算には、Uhlman によって提案された、粘性流体の基礎式から得られた“総エネルギーに関する積分方程式”を解くことで求める。また、浮体壁からの渦の発生には、滑らかな表面からの渦度の生成と流体内への渦度の拡散には渦層モデルを、物体の角部から発生する渦度の表現には、Vorticity shedding モデルを用いる。また、空気室内の空気の挙動については、空気を理想気体とみなして、状態方程式、質量保存則、エネルギー保存則を用いる。

(2) 水槽実験

a) BBDB に関する 2 次元実験

佐賀大学海洋エネルギー研究センター所

有の2次元造波水槽を用いて、空気タービンをオフィス負荷と置き換えた小型 BBDB 模型(長さ 85cm, 幅 78cm, 高さ 60cm)を用いて、規則的な入射波の周期や波高、BBDB の形状や慣動半径を変化させた実験を行い、波高計を用いて、入射波の波高、周期および空気室内の水面変位を、圧力計を用いて空気圧力を、ビデオトラッキングシステムを用いて BBDB の運動を計測し、一次変換効率等を求めた。また、BBDB に働く漂流力に関する実験を行い、BBDB が波上側へ移動する現象(負の漂流力の発生)の原因について調べた。

b) 固定式の振動水柱型装置に関する実験

2次元造波水槽の端部に、カーテンウォール、空気室、空気タービン、発電機を備えた固定式の振動水柱型波力発電装置模型を製作し、入射波の周期や波高、空気室形状、タービン形状、発電機を変化させ、それらが発電効率に及ぼす影響を調べた。空気タービンについては、佐賀大学で開発した案内羽付き衝動タービンについて、案内羽の枚数、ロータ翼の枚数、ロータ径を変化させた実験を行った。また、ウェルズタービンについても翼の枚数を変化させた実験を行った。

c) BBDB に関する3次元実験

九州大学応用力学研究所の3次元造波水槽を用いて、空気タービン、発電機を搭載した単一の中型 BBDB 模型(2.5m, 幅 2.3m, 高さ 1.8m)の重量分布の変化が発電性能に及ぼす影響や2基の小型 BBDB を波の峰に平行に配置した時の2基の BBDB の一次変換効率等について、特に BBDB の配置間隔の影響を調べる。

4. 研究成果

(1) 性能評価のための数値計算法の開発

a) システムシミュレーションの開発

BBDB のシステムシミュレーションの基礎となる周波数領域での3次元 BBDB に関するラディエーション問題とディフラクション問題について、計算結果と実験結果の比較を行った。BBDB 固定時に BBDB に働く波強制力、ラディエーション問題から得られる付加質量係数、造波ダンピング係数のすべてについて、空気室内の水面変位が大きくなる波周期や加振周期において、実験値に比べ計算値が過大になることがわかった。これは、計算が流体の粘性や渦の影響を無視したポテンシャル理論に基づいていることに起因することによる。このため、この対策として空気室内部の水面条件にレーリー摩擦を導入して、その係数を変化させ、BBDB に働く Surge 方向、Heave 方向、Pitch 方向の波強制力とこれらの方向の付加質量係数、造波減衰力係数に関する計算値と実験値が一致する係数を選定した。これらの計算結果を用いて畳み込み積分を行い、浮体の動揺と空気室内の空気圧力によるメモリー影響係数を計算した。空気室内の空気の挙動に関しては、空気室内に空気圧力と温度の変動は小さいと考え、最終的に、

これらの一次の変動分に関する時間変化に関する2つの常微分方程式を導いた。空気タービンの回転に関する運動方程式に関しては、発電機やその他の軸受け等による損失トルクに算定は装置によって変化するため、これを無視した方程式を用いて、最終的に、線形係留された3次元 BBDB の6自由度運動、空気室内の空気圧力と温度、タービンの回転角速度に関する同数の式が各時刻に解いて行く基本的な計算プログラムを作成した。中型模型に関する実験結果との比較では、BBDB の運動時に発生する浮体端部からの渦によるエネルギーロスの影響の考慮が必要であることが分かった。今後の課題である。

b) 渦度を未知量とした性能解析手法の開発

1) 渦積分方程式法

①流速を求める Biot-Savart の式に相当する第1の積分方程式、②渦度を求める第2の積分方程式、③圧力、位置エネルギー及び運動エネルギーの和で表される総エネルギーに関する第3の積分方程式を用いて、Rayleigh 流れ、振動平板上の粘性流れ等の一次元流れの計算を行い、解析解との比較を行い、この計算法の有効性を確認した。一樣流中の2次元円柱の計算も行い、円柱に働く流体力の計算も行った。この計算法では、各時刻において、流体の境界と内部の計算点における流速と渦度を未知量として求める必要があるため、計算法の高速度化が課題であることが分かった。今後の課題である。

2) 渦法

Yeung ら(2002)と同様に、流れ関数と渦度を未知量として扱うが、①渦度の粘性拡散の計算に、Yeung ら用いた Random-Walk 法よりも精度の良い Core-Spreading 法を用いる、②物体境界面からの渦度の発生方法に関しては、滑らかな物体表面については渦層モデル、物体の角部については Vorticity shedding モデルの2つを併用する、③物体表面に働く流体圧力の計算には、Uhlman (1992)によって提案された、粘性流体の基礎式から導かれた“総エネルギーに関する境界積分方程式”を用いる、の改良を加えた“粘性流体を対象とした、渦法による2次元浮体構造物の非線形波浪中挙動解析法”を提案(永田、今井他:2015, 2017)して、没水平板の鉛直運動、係留された矩形や三角形断面浮体の波浪中運動、浮体式の振動水柱型波力発電装置 BBDB の波浪中挙動と一次変換効率(波パワーから空気パワーへの変換効率)に関する計算結果と実験結果と比較することにより、提案した計算手法の有効性を示した。この方法では、具体的な数値計算に境界要素法を用いるため、任意の浮体形状に適用可能で、浮体や自由表面等の流体境界の時間的な移動や変形を正確に追跡できるとともに、各時刻での計算における未知量が流体境界上のみ存在し、流体内部には存在しないので、計算

容量を大幅縮減できるという利点がある。この“渦法による波浪中浮体運動解析法”は、現在、海洋構造物の流体性能解析の標準計算ツールとして用いられている“粘性と渦を無視した境界積分方程式法”を粘性流体へ拡張した方法と考えることができ、申請者らは、この計算法の提案で、日本船舶海洋工学賞（論文賞）、日本造船工業会賞、日本海事協会賞の3賞を受賞(2016)した。また、この方法を用いて、BBDBに働く漂流力を計算して、特定の波周波数帯で、BBDBが波上側へ移動する（負の漂流力）現象を表現できることがわかり、漂流力係数についても実験値とよく一致することがわかった。

(2) 水槽実験

a) BBDBに関する2次元実験

BBDBの2次元模型に関する一次変換性能に関する実験を行い、規則的な入射波の周期の波高、BBDBの形状や慣動半径を変化させた実験を行った。特に、BBDBの重量分布に伴う慣動半径が、BBDBのPitch運動や一次変換効率に大きく影響することがわかった。また、BBDBに働く漂流力に関する実験を行い、BBDBが波上側へ移動する現象（負の漂流力の発生）の原因について調べ、渦法計算法の検証データとしても利用した。

b) 固定式の振動水柱型装置に関する実験

従来の振動水柱型装置設計に用いるための実験では、空気室天井にオリフィス孔を設けて、タービン負荷をオリフィス負荷に置き換えたモデルに関する“波パワーから空気パワーへの変換（一次変換）効率”に関する実験と、空気タービン模型に関する風洞試験を行い、それに発電機特性（二次変換）を追加考慮して、装置全体の発電性能評価を行っていたが、この方法では、装置全体の最適化のための構成要素（浮体形状やタービン緒元等）のマッチングが困難であった。この問題を解決するため、本実験では、装置全体の模型を製作し、入射波の周期や波高、空気室形状、タービン形状、発電機を変化させ、それらが発電効率に及ぼす影響を調べた。本実験から、装置の各変換過程での変換効率を含め、装置全体の最適化のための構成要素（浮体形状やタービン緒元等）のマッチングに関する実験データを得ることができた。また、案内羽付き衝動タービンとウェルズタービンの明確な特性比較データを得ることができた。

c) BBDBに関する3次元実験

空気タービン、発電機を搭載した単一の中型BBDB模型（2.5m, 幅2.3m, 高さ1.8m）の重量分布の変化が発電性能に及ぼす影響や2基の小型BBDBを波の峰に平行に配置した時の2基のBBDBの一次変換効率に及ぼすBBDBの配置間隔の影響が明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計7件）

- (1) 永田修一, 大窪慈生, 今井康貴, 村上天元, 岡本豊: 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-第3報 浮体式振動水柱型波力発電装置の一次変換性能解析, 日本船舶海洋工学会論文集、第25号、pp. 21-31, 2017年6月
- (2) T. Murakami, Y. Imai, S. Nagata, M. Takao, T. Setoguchi: Experimental Research on Primary and Secondary Conversion Efficiencies in an Oscillating Water Column-Type Wave Energy Converter, *Sustainability*, 8(8), 756, 1-11, 2016年08月
- (3) 村上天元, 今井康貴, 永田修一, 高尾学, 瀬戸口俊明: 固定式振動水柱型波力発電装置の1次および2次変換効率に関する実験的研究, *ターボ機械*, 44, 6, 364-371, 2016年06月
- (4) 大窪慈生, 永田修一, 今井康貴, 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, 第2報, 日本船舶海洋工学会論文集、第22号、pp. 55-65, 2015
- (5) H. Isshiki, S. Nagata, Y. Imai: Solution of diffusion problem in a non-homogeneous flow and diffusion field by the integral representation method, *Applied and Computational Mathematics*, 3 (1), pp.15-28, 2014
- (6) H. Isshiki, S. Nagata, Y. Imai: Solution of Viscous Flow around a circular Cylinder by a New Integral Representation Method (NIRM), *Asian Journal of Engineering and Technology*, Vol.02, Issue02, pp.60-82, 2014
- (7) 今井康貴, 永田修一, 豊田和隆, 村上天元: 規則波中における後ろ曲げダクトブイ型波力発電装置の一次変換性能に関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会論文集、第19号、pp. 79-88, 2014

〔学会発表〕（計3件）

- (1) S. Nagata, Y. Imai, T. Murakami, Y. Okamoto: Numerical Analysis on Drift Force Acting on a Floating OWC-Type Wave Energy Converter “Backward Bent Duct Buoy” by Vortex Method, *Proc. of the 27th ISOPE Conference*, pp.71-78, 2017
- (2) S. Okubo, S. Nagata, Y. Imai, T. Murakami, T. Setoguchi: Performance Analysis of a Floating OWC-Type Wave Energy Converter by Vortex Method, *Proceedings of the 3rd Asian Wave & Tidal Energy Conference*, 667-676, 2016年10月
- (3) Y. Imai, S. Nagata, T. Murakami, M. Takao, T. Setoguchi: Experimental Study of the Generating Efficiency of a

Fixed Oscillating Water Column Type
Wave Energy Converter, Proc. of the
25th ISOPE Conference, pp.843-848,
2015

〔図書〕（計1件）

- (1) 近藤倅郎, 経塚雄策, 永田修一, 池上康之, 宮崎武晃, 谷野賢二: 海洋エネルギー利用技術、第2版、第4章、波力、森北出版 2015年

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

〔その他〕

(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

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

村上天元 (MURAKMI Tengen)
佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・助教
研究者番号: 90611278

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

(3) 連携研究者

なし