

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 21 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420828

研究課題名(和文) 渦法による非線形波浪中における浮体の挙動および周辺流場解析法の開発

研究課題名(英文) Analysis of interaction between floating bodies and nonlinear waves by vortex method

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：フィン等の動揺低減構造を備えた洋上風力発電や海洋温度差発電用の浮体や、単一又は複数物体の波浪中運動の共振状態を積極的に利用して発電する波力発電装置等の浮体式海洋エネルギー利用装置の波浪中挙動や発電性能を推定し、これらの装置の浮体形状や搭載された各種発電関連機器の最適化のためには、流体の粘性や物体表面から発生する渦の影響を考慮した流体解析手法が必須である。本研究では、渦法をベースに、従来の計算法では困難とされていた、浮体から発生し、流体中に放出される渦の影響を正確に考慮して、流場・流体力・浮体運動を求める高速計算法を開発した。

研究成果の概要(英文)：To maximize the extraction of wave energy, floating type wave power generation device utilizes the resonance of motion. To optimize shape of the floating body and electric facilities mounted on the body, new analysis method is required. The effect of viscosity and vortex should be included in the method. We have developed a new numerical method that based on a vortex method. The effect of viscosity and vortex is considered in the method. The results obtained with the new numerical method showed good agreement with experimental results

研究分野：海洋工学

キーワード：渦法 海洋構造物 非線形波浪 波力発電

1. 研究開始当初の背景

近年、石油価格の高騰および温暖化ガス排出制限のため、エネルギーの利用形態は、化石燃料から太陽光発電や風力発電など、再生可能エネルギーへのシフトが進みつつある。海洋についても、海洋に存在する再生可能エネルギーとしての風、波浪、潮流、熱を利用して発電する洋上風力発電、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電等に関する研究開発と具体的な商用化プロジェクトが世界各地で進行している。わが国においても、洋上風力発電を筆頭に海洋エネルギー利用に関する大型プロジェクトが、現在、NEDO、環境省、経済産業省の主導の下に進められている。これらの海洋エネルギー利用装置に関しては、単体装置の利用だけでなく、大規模発電を目指して、浮体型装置をベースにして、沖合にそれらを多数配置した大規模 farm の計画等も発表されている。

洋上風力発電や海洋温度差発電のための発電関連設備を搭載した浮体構造物では、波浪中の浮体動揺を低減するために、水面下の浮体周囲に複数の薄板構造のフィンを設置する場合も多い(図-1)。また、波力発電には、単一又は複数物体の波浪中運動の共振状態を積極的に利用して発電する可動物体型方式や、振動水柱型の共振状態を利用して発電する振動水柱型方式がある。このように、水面下のフィンの動揺時や、水中での物体や振動水柱の共振時には、物体表面から放出される渦の散逸により浮体には大きな減衰力が働くため、このような状態にある浮体動揺や発電性能の推定は、従来の完全流体の渦なし流れとしたポテンシャル理論に基づく流体解析法では困難で、流体の粘性や物体表面から発生する渦の影響を考慮した流体解析手法が必須となる。

そこで、本研究では、近年、著しい発展をみせているものの、海洋分野には適用例が少ない渦法を用いて、従来の計算法では困難とされていた、浮体から発生し、流体中に放出される渦の影響を正確に考慮して、浮体式海洋エネルギー利用装置に作用する流体力、浮体運動及び周辺流場を求める高速計算法を開発する。開発した計算手法を用いて、開発した計算手法を用いて、幾つかの具体的な浮体構造物を対象に計算を行い、対応する実験で得られた実験結果との比較を通して計算法の検証を行う。

2. 研究の目的

フィン等の動揺低減構造を備えた洋上風力発電や海洋温度差発電用の浮体や、単一又は複数物体の波浪中運動の共振状態を積極的に利用して発電する波力発電装置等の浮体式海洋エネルギー利用装置の波浪中挙動や発電性能を推定し、これらの装置の浮体形状や搭載された各種発電関連機器の最適化のためには、流体の粘性や物体表面から発生する渦の影響を考慮した流体解析手法が必

須である。本研究では、渦法をベースに、従来の計算法では困難とされていた、浮体から発生し、流体中に放出される渦の影響を正確に考慮して、流場・流体力・浮体運動を求める高速計算法を開発する。計算では、水面波の非線形性、浮体表面からの渦の発生と拡散を考慮して、流体の流速と圧力、水面変位、渦度、浮体の動揺を時間的に追跡する。積分方程式で表示された流体の流速と圧力の計算には、高速多重極法を導入して計算の高速化を図る。開発した計算手法を用いて、幾つかの具体的な浮体構造物を対象に計算を行い、対応する実験で得られた実験結果との比較を通して計算法の検証を行う。

3. 研究の方法

本研究で対象とする、自由表面を持った流体中にあるフィン等の付加物付浮体等、浮体や付加物から生じる渦の生成、拡散を正確に求めることができる粘性流体計算手法の候補としては、VOF法やCIP法等の差分法、

MPS法やSPH法等の粒子法、渦法がある。この内、の差分法では、流体領域を格子分割するため、時間的に移動する鋭く尖った翼表面境界に沿って、時間ごとに格子分割を行うことは非常に困難である。また、流体を無数の流体粒子の集まりとして考えるの粒子法では、本研究で対象としている付加物等の周りに生じる渦や、渦の存在によって浮体や付加物に生じる流体力等の計算は現状では困難なように思われる。本研究で対象とする波浪中の構造物の周りの流れは高レイノルズ数であり、計算では、物体表面の薄い境界層内部での渦の発生、発生した渦の流体中への拡散、物体からの渦の剥離等を正確に評価する必要があるという点から、渦法が適していると思われる。渦法は、複数物体間の流体力学的干渉や、共振周期での浮体運動による流体力と周辺流場の計算も可能である。

渦法は、近年、新展開がはかられている。従来の離散渦法は、対象が非粘性流れで、基本的には、角を持つ物体周りの流れのように、渦の発生点が明確な場合にしか適用ができない、剥離点が明確でない物体まわりの流れに適用する場合には、別途、境界層計算が必要という制約があった。一方、渦法と呼ばれる新しい計算法は、対象が粘性流れで、渦の発生点も指定する必要が無いので、任意の物体形状に適用可能である。現在では、従来の離散渦法は、渦法の近似的取り扱いにすぎないと認識されている。

渦法は、流場の連続的な渦度分布を多数の微小渦要素によって離散的に表し、渦度方程式を数値的に解いて、流れに乗った渦要素の移動と拡散を追跡することにより、流場の時間的変化を計算するものであり、アルゴリズムが簡単である、高レイノルズ数流れの計算に適している、数値安定性が良い、数値拡散の原因を本質的に持たない、任意の物体形状に適用可能で、計算境界の移動・

変形が自在に取り扱うことが可能である、空間に格子形成を必要としないことから、他の CFD 手法と比較して計算負荷を減じることができる、等の利点を持つ。

このような新しい渦法の自由表面を持つ波浪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。R.W.Yeungら(2002)は、流れ関数と渦度を未知量として扱い、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、小規模固定フィン付き浮体の2次元動揺問題を扱っている。申請者ら(大窪, 永田, 今井他 2012)も、流れ関数と渦度を未知量として扱い、渦度の粘性拡散の計算に Core-Spreading 法を用いて、2次元没水平板の鉛直方向強制振動による流体力解析を行い、平板に働く鉛直流体力は、Random-Walk 法よりも精度の良い解が得られることを示している。また、申請者らは、線形係留された没水柱浮体の動揺解析も実施して、実験値との比較によりその有効性を確認している。他方、M.Y.Lin 他(2012)は、流速と渦度を未知量として扱い、2次元潜堤周りの波の変形解析に Core-Spreading 法を用いている。渦法の3次元波浪問題への適用については、自由表面の無い内部流れに関して、機械工学の分野で、流速と渦度を未知量とした多数の研究があるものの、自由表面を伴う水面波問題への適用は見当たらない。

本研究では、渦法を、波浪と2次元及び3次元浮体との連成問題解決のための実用計算法とすることを目的とする。3次元問題への拡張を念頭に、粘性流体に関する流速、渦度、流体圧力を未知量として、水面の非線形性を考慮した波浪と2次元及び3次元浮体の連成挙動に関する時系列計算法を開発した。計算では、微分型表示の連続の式と Navier-Stokes から得られた流速に関する積分方程式、微分型表示の渦度方程式、流体圧力に関する積分方程式の3つの基礎式を用いる。この内、流速と流体圧力に関する積分方程式は、流体領域の内部と境界に関する積分方程式となっているので、移動境界としての時々刻々の自由表面と浮体表面位置を追跡することができる。計算の効率化のために積分方程式の解法に高速多重極法を適用する方法を開発する。渦を blob モデルで表し、微分型の渦度方程式の解法では、Fractional step 法を用いて、Convection step, Diffusion step の2段階で計算する。Diffusion step の計算では、渦度の粘性拡散の計算法として、Core-Spreading 法を中心に、Particle Strength Exchange 法等を比較検討する。また、渦層モデル等の壁面からの渦度生成の最適モデルを選定、提案した。

開発した計算法は、波浪中動揺に関する水槽実験結果との比較により検証するとともに、解析法の精度向上を図った。

4. 研究成果

二次元水槽内に設置された固定式振動水柱型波力発電装置(OWC)を対象に計算方法の検証を行った。数値計算領域の概略を図1に示す。OWC はカーテンウォール, 空気室で構成される。空気室の天端中心にはノズルが設けられており, 空気が入り出る。計算開始時刻 $t=0$ で流体は静止状態とし, 片方の境界から規則波を入射させた。計算条件を表1に示す。水深 h と波長 λ の比 $h/\lambda = 0.10 \sim 0.40$ の条件について計算を行った。入射波の周期 T を用いて無次元時間を $T^*=t/T$ と定義し, 計算の時間ステップは $T^*=0.01$ とした。計算は $T^*=20$ まで行った。

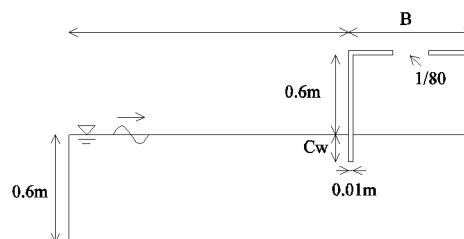


図1 固定振動水柱型波力発電装置

表1 入射波条件

Water depth (m)	0.6
Incident wave amplitude (m)	0.0435
Non-dimensional time step (T^*)	0.01
Total calculation time(T^*)	20
Ratio of depth and wave length (h/λ)	0.10 ~ 0.40
Curtain wall depth C_w (m)	0.1
Air chamber length B (m)	0.70
Nozzle ratio	1/80

一次変換効率(入射波パワーに対する空気パワー)を図2に示す。壁面で発生させた渦は水面近くで消去させる必要がある。図2中の「1」「2」「2.5」はそれぞれ静水面から1cm, 2, 2.5cmの渦を消去した結果である。また水槽実験の結果を青で示す。本計算方法による結果は実験結果とよい一致を示した。

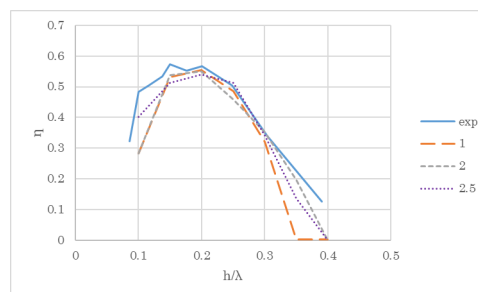


図2 固定式振動水柱型波力発電装置の一次変換効率

次に、浮体式の振動水柱型波力発電装置（後ろ曲げダクトブイ）に適用した。図3に波力発電浮体と計算対象モデルと計算領域を示す。浮体はバネにより係留され、左から規則波が入射する場合を想定した。浮体を透過した波は吸収帯で右端壁からの反射エネルギーを吸収した。左端から規則波が入射する場合の一次変換効率を図4に、浮体のピッチ振幅を図5に示す。黒が計算値、青が実験値を示す。一次変換効率は入射波パワーに対するノズル通過パワーの大きさである。横軸は浮体全長Lに対する入射波長である。図4において計算値は $\lambda/L=3.5$ 付近で実験値と差が出たが、全体的に同じ傾向を示した。図5のピッチ運動は実験と合致する良い結果が得られ、計算方法の妥当性が示された。

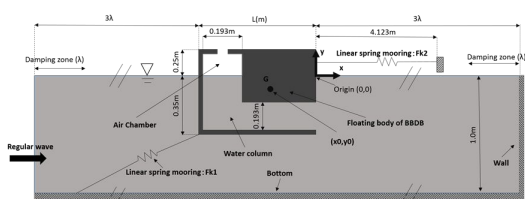


図3 計算対象

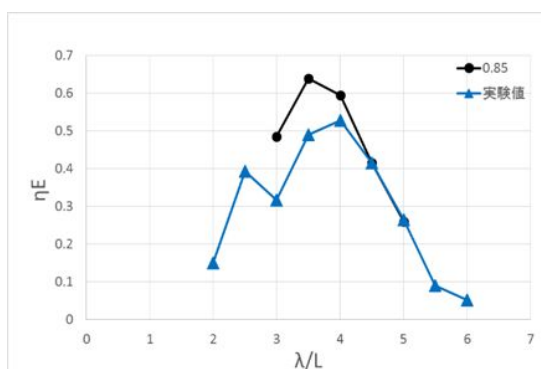


図4 一次変換効率

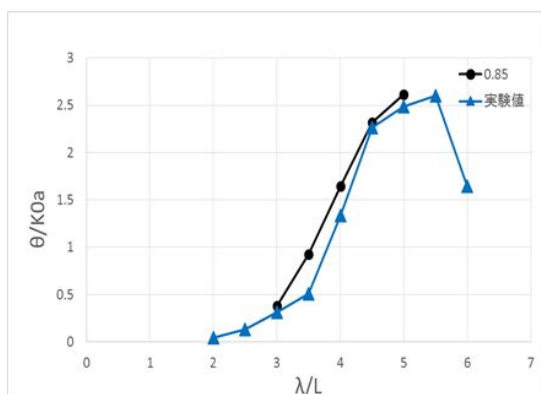


図5 ピッチ運動振幅

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 0件)

〔学会発表〕(計 1件)

Performance Analysis of a floating OWC-type Wave Energy Converter by Vortex Method, Shigeki Okubo, Shuichi Nagata, Yasutaka Imai, Tengen Murakami and Toshiaki Setoguchi, Proceedings of the 3rd Asian Wave & Tidal Energy Conference, 2016, Singapore

〔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
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

村上 天元 (MURAKAMI, 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

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし