

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04581

研究課題名（和文）不規則波中の波浪発電浮体アレイの発電ポテンシャルを引き出す実用的制御手法の検討

研究課題名（英文）Research on practical choice of control forces' parameter for drawing out the power potential of WEC array in irregular waves

研究代表者

村井 基彦（Murai, Motohiko）

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授

研究者番号：60292893

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：浮体式波浪発電システムの一つであるリニア式PA-WECについて、波浪中の発電効率の最大化に関する研究を行った。リニア式PA-WECでは浮体運動を制動させることで、エネルギーを浮体運動から回収することができる。波浪中で適切な制動力を用いることで、波浪発電量の最大化を図ることができる。本研究では、複数PA-WECにおける波干渉を踏まえた最適制動力の決定手法、複数PA-WECの波浪中の最適な配置、また不規則波中において発電量の最大化を図れる制動力の時系列決定手法について提案し、数値的にその有効性と実効性を検証した。また最適制御力を教師データとするAIモデルによる制御力決定についても検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波力発電システムは、波のエネルギーから電力を産むシステムである。波エネルギーは波高の2乗に比例し、日本近海でも大きなポテンシャルがある。一方で、波エネルギーを取り出すには、その波によって物体を動かし、その動いた物体の運動エネルギーからエネルギーを取り出す必要がある。本研究では浮体での波力発電システムを想定し、規則的な波の場合における最適なエネルギーを取り出す制御係数の決め方、複数の波力発電システムを想定したときの波の干渉を効果的に利用できる配置やその時の制御係数の決定法とその効果、実際に想定される不規則波の中での最適な制御係数の決定方法などについて、数値解析を通して明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The Linear type PA-WEC is one of the system of a floating Wave Energy Converter. In this system, a given driving force decides both of the motion of PA-WEC and generated energy. It needs the optimal driving control force for maximizing the generated electric power. In this research, we proposed the analytical/numerical methods of deciding the optimal control force and the arrangement of multi-PA-WEC in regular waves. Furthermore, we show the time domain analytical solution of maximizing the power generation in irregular waves defined with wave spectrum. These were confirmed and validated via a lot of numerical simulations. And as an additional proposal, we carried out the method of deciding the optimal control force in irregular waves by using AI model.

研究分野：海洋工学

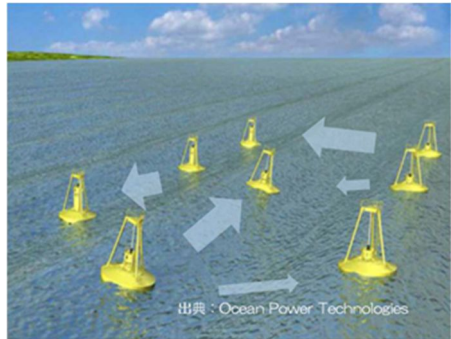
キーワード：波浪発電 浮体式 波エネルギー 波浪発電ファーム 波の干渉

1. 研究開始当初の背景

化石燃料による地球温暖化問題、原発の安全性、エネルギー自給率などを背景に、国内でも再生可能な自然エネルギーが大きな注目と期待を集め、日本政府も国内一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーの比率を2020年までに10%以上、2030年までに20%以上に引き上げることを目標化している。その目標達成の為に、日本が世界第6位の排他的経済水域の地の利を活かした海洋再生可能エネルギーの利活用技術がキーテクノロジーであり、波浪発電はその有望なものの一つである。

しかし、現段階において波浪発電の発電コストは化石燃料による発電コストの3~4倍程度と見積もられている例もあるように、広く活用されるにはそのコストが課題となる。その解決策は、発電機の設置費も含めた支出削減と、発電機としての発電効率の向上による収入増となる。この両面に対して効果が期待できるのが多数の発電機によるアレイである。

アレイによる最大のメリットは、多数の発電機によるアレイユニットを形成することによって、係留系や設置、送電・蓄電設備の共有化が図られることによる、実質的な支出の削減である。一方、アレイによる発電効率の向上の原理は、発電浮体間での波の干渉による相乗的な効果を得るもので、単独の発電浮体では浮体から散逸してしまう反射波や浮体運動に伴う散乱波を、他の浮体の入射波としてエネルギーを2次的に回収することによって、実質的な発電性能の向上を図る戦略である。しかし、実海域での不規則な波浪中における実質的な向上の効果が明示的に得られた開発研究はまだない。その理由が、アレイによる発電効率の向上の鍵となる複数の発電器間での流体力学的な干渉効果による入射する波エネルギーの見積もりの難しさと、それをふまえた波エネルギーから発電への制御の難しさにある。



この発電浮体には様々な形式が提案されているが、ポイント・アブソーバ型発電浮体は、波浪中に主に上下揺れを伴うブイ型の浮体で、厳しい海象条件に対し安全性を担保し易く、アレイへの展開などが比較的容易であるとされている。このポイント・アブソーバ型発電浮体にリニア発電機を搭載し同調制御技術の組合せた実証実験が欧州において実施されているが、水槽実験などで想定された発電能力がうまく発揮されていない。

その要因として、その実証実験では制御アルゴリズムにおいて不規則波である自然波の卓越周期に浮体運動を同調させることを軸としているため、卓越周期から外れた波に対する応答倍率が低下し、同調制御を行う事によってかえってエネルギー収支が悪化してしまうことが要因の一つと指摘されている。またアレイに関する研究についても、水槽実験は実施されているが、必ずしも効率が上がっていない。この要因の一つとして、アレイにおいても単独での制御を延長的に適用していることが挙げられている。

2. 研究の目的

リニア発電機を搭載したポイント・アブソーバ型を想定実機とし、実海域を想定した不規則波中において、場の代表値や平均値ではなく、時々刻々変化する場を捉え、且つアレイとしての幾何学的な相対位置も個々に考慮したパラメータを時々刻々解析し制御力としてフィードバックさせることで、浮体式波浪発電アレイユニットの発電量最大化を目的とした研究を行う。本研究での課題のポイントは次の4つとする。

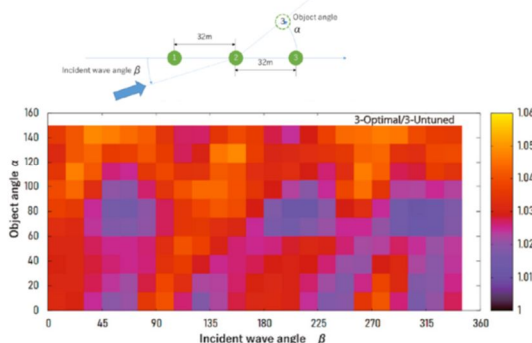
- A) 不規則波中でのアレイ間での波の干渉効果を引き出せる浮体形状とその配置の最適化
 - B) 不規則波中でのアレイを構成する個別浮体に入射する干渉効果も含めた波エネルギーの逐次推定法の確立
 - C) 海象条件に応じた制御戦略の効率的選択アルゴリズムとパラメータ選択システムの構築
 - D) A)~C)を踏まえた発電制御力(発電量をするためのPTO(Power Take Offシステム)に掛けるエネルギー回収用の負荷力)のアレイ内での個別化と逐次最適化
- これら4点を解決することで、アレイユニットとして、周波数領域や波スペクトルをベースとする波浪発電の発電量期待値を、実践的な不規則波中において実用的に発電可能であることを示し、従来のアルゴリズムではエネルギーを回収できないでいた海象条件においても発電可能とすることも含め、実質的な年間発電期待値を2割向上させることを本研究課題の総合的な目標とする。

3. 研究の方法

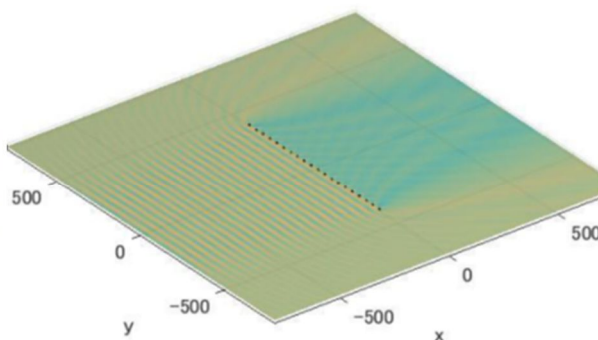
研究目的を達成するために、リニア発電機を搭載したポイント・アブソーバ型を想定実機として、取得エネルギーの最大化を達成できる最適な制御力の推定手法を搭載した数値解析モデルの構築を行い、その数値解析モデルによる数値計算をベースに、規則波問題、複数の浮体の波干渉を取得エネルギーの最大化に生かす手法に関する問題、より実際的な不規則波中における最適制御係数の決定手法の提案とそれに基づく数値解析モデルの構築、および新規に構築した数値解析モデルによる数値解析を実施することで、その有効性の検証と検討を行った。

4. 研究成果

過去の研究では単機の PA-WEC における適切な制御力が、線形理論の範囲内で解析的に求められることが示されている。本研究課題では発電機の制御力成分を取り込んだ上で、運動方程式との連成から制御力の最適化を検討し、複数の PA-WEC の相互干渉と銅損を考慮した最適な制御力係数を数値的に求める手法を提案した。また、その手法を用いて数値計算を行った結果、以下の知見を得た。



図：3浮体問題での波向きと配置と波エネルギー

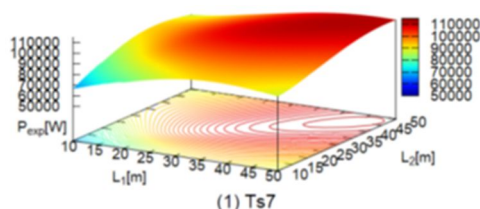


図：浮体アレイ問題で最適時の波浪場

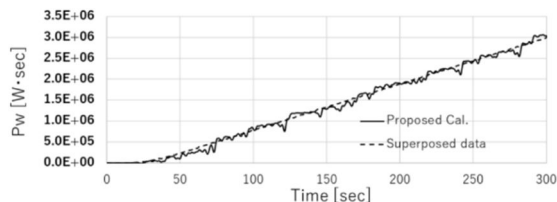
浮体列として発電期待値を最大化するには、浮体を波の進行方向に対して直交するように等間隔に配列し、浮体ごとに適切な制御力を与えることが有効である。一方で、発電期待値が最大値となる浮体間距離は浮体数にほとんど影響されない。

それを踏まえたうえで、浮体列としての浮体あたりの発電期待値が最大となるような直交に配置された列配置同士を比べると、その発電期待値は浮体数が増えるほど大きくなる傾向がある。つまり、浮体あたりの発電期待値を最大化するには、適切な浮体間距離で等間隔により多くの浮体を列配置すればよい。しかし、浮体数を増やしていくと、その発電期待値の増加傾向は緩やかになっていき、おおよそ 10 機以上並べれば無限列に近い干渉による増加効果が得られる。

さらに、PA-WEC の配置の等間隔性に対する感度は決して高くなく、最適な浮体間距離に対して、「極端に近接しない（本機では 20m 以上）距離を保っていれば、浮体間距離にばらつきのある不規則な配置でも最大の発電期待値に対して発電期待値を著しく減少させないこと」 PA-WEC の列配置と発電期待値の関係においては、円柱群で観測されるトラップモードのような狭い周期範囲での鋭いピークのような傾向とは異なり、発電期待値最大化に対しての最適な浮体間距離や等間隔性の感度が低いこと」が確認でき、PA-WEC の列配置には、実用的に十分な許容範囲があることを示せた。



図：不規則波での浮体距離と発電量



図：不規則波中で最適制御法の提案とその有効性（理想最大値が取得できていることを確認）

また、最終年度においては、周波数領域問題だけでなく、時間領域問題についても不規則波スペクトル下での発電量を最大化できる制御力について検討を行い、「不規則波中の時系列問題について発電量を最大化できる制御力の決定法に解析的な解法を初めて示し、その値が波スペクトルから推定される最大期待値と一致すること」「その理論に基づいた数値計算を通してその理論の有効であること」の知見を得た。また当初の計画には無かった最適制御力を教師データとする AI モデルによる制御力決定についても検討を行い、その可能性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 舩田純希, 村井基彦, 李僑	4. 巻 -
2. 論文標題 ポイントアブソーバー型浮体式波力発電システムの列配置が 発電量に与える影響に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.31.59	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Motohiko Murai, Li. Qiao, Junki Funad	4. 巻 -
2. 論文標題 STUDY ON THE GENERATED POWER CHANGES BY THE RELATION BETWEEN AN ARRANGEMENT OF AN ARRAY OF POINT ABSORBER TYPE WECS AND AN INCIDENT WAVE ANGLE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/OMAE2019-95400	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li. Qiao, M.Murai	4. 巻 -
2. 論文標題 CONTROL STRATEGY FOR A POINT-ABSORBER WAVE ENERGY CONVERTER	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/OMAE2019-95836	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li Qiao, Murai Motohiko, Kuwada Syu	4. 巻 11
2. 論文標題 A Study on Electrical Power for Multiple Linear Wave Energy Converter Considering the Interaction Effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2964 ~ 2964
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en11112964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Li Qiao, Murai Motohiko	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of a Practical Prediction Method of Wave Force for a Wave Energy Converter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers	6. 最初と最後の頁 125 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.27.125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Li Qiao, Murai Motohiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on a Time Domain Prediction Method for Wave Force: Application for a Point-Absorber WEC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/OMAE2018-77720	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murai Motohiko, Li Qiao, Funada Junki, Shigetome Hasuki	4. 巻 -
2. 論文標題 On Prediction Method of Optimized Control Parameters for an Array of Point Absorber Type Wave Energy Converters in Waves	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OCEANSKOB.2018.8558847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 村井基彦
2. 発表標題 THE FUNDAMENTAL RESEARCH ON AI PREDICTION AND DETERMINATION OF CONTROL FORCE FOR MAXIMIZING THE POWER GENERATION OF PA-WEC IN IRREGULAR WAVES
3. 学会等名 OMAE2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村井基彦
2. 発表標題 HOW THE HYDRODYNAMIC RESPONSE OF PA-WECS ' ARRAY UNDER MAXIMIZING THE POWER GENERATION BY ITS ARRANGEMENT AND CONTROL FORCE CHANGE?
3. 学会等名 OMAE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 舩田純希
2. 発表標題 The study on a trend of the appropriate control forces for maximizing the power generation on lined up multi PA-WECS
3. 学会等名 EAWOMEN2 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村井基彦
2. 発表標題 STUDY ON THE GENERATED POWER CHANGES BY THE RELATION BETWEEN AN ARRANGEMENT OF AN ARRAY OF POINT ABSORBER TYPE WECS AND AN INCIDENT WAVE ANGLE
3. 学会等名 OMAE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李僑
2. 発表標題 CONTROL STRATEGY FOR A POINT-ABSORBER WAVE ENERGY CONVERTER
3. 学会等名 OMAE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村井基彦
2. 発表標題 A SIMPLE PREDICTION METHOD OF IRREGULAR WAVES FOR CHOOSING A CONTROL PARAMETER OF A WAVE ENERGY CONVERTER SYSTEM
3. 学会等名 SNAK 2019 Annual Autumn Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Motohiko MURAI
2. 発表標題 STUDY ON A TIME DOMAIN PREDICTION METHOD FOR WAVE FORCE
3. 学会等名 the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junki FUNADA
2. 発表標題 On prediction method of optimized control parameters for an array of point absorber type Wave Energy Converters in waves
3. 学会等名 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------