

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06472

研究課題名(和文) 風車と波力発電装置の協調制御による浮体減揺装置の開発

研究課題名(英文) A Study on Cooperation Control of Wave Energy Converter and Wind Turbine for Motion Reduction

研究代表者

朱 洪忠 (Zhu, Hongzhong)

九州大学・エネルギー基盤技術国際教育研究センター・助教

研究者番号：00752932

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、浮体式洋上風車に波力発電装置を取付け、波力発電装置と風車制御により浮体動揺の低減を目的とし、以下の成果を得た。まず、波力発電装置のパワーテイクオフをバネとダンパーで模擬し、そのパラメーターの最適設計法を開発した。次に、波力発電装置のパワーテイクオフを可変ダンパーとして考え、セミアクティブ制御で浮体動揺低減について検討し、シミュレーションで確認した。さらに、高性能3Dプリンターを活用し、風力波力複合装置の3次元模型を製作した。提案手法の有効性を検討するため水槽実験を行った。スモールスケール模型で流体粘性摩擦の影響が大きく、波力発電装置の動きが小さかった。模型の改善が必要となる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a system combining a floating offshore wind turbine and wave energy converters is proposed. The system is controlled to reduce the pitching motion of the floating system so that the fatigue life can be improved. Firstly, the optimal design method of the wave energy converters including the mass, the spring coefficient and the damping coefficient was developed by modeling the power take-off device as the combination of a linear spring and a linear damper. Then, model predictive control method was proposed to control the power take-off devices to suppress the pitching motion of the floating platform. The effectiveness was verified via simulations. Furthermore, High performance 3D printer was applied to make a small scale model for tank experiments. Owing to the friction, the motion of the wave energy converters was small and the experimental results had some difference with simulation results.

研究分野：制御工学

キーワード：風力波力複合装置 モーションコントロール 波力発電装置

1. 研究開始当初の背景

(1) 風力エネルギーは、再生可能エネルギーの中でも発電コストが低いことから世界的に導入が進んでいる。資源量と設備利用率の観点、広い空間利用が可能であるという観点から、洋上風力エネルギーは増々注目されている。日本風力発電導入ロードマップ(中長期導入目標 V4.3)により、2050 年まで風力発電導入量は2014年時点の約10倍を目指しており、中でも洋上風力発電はその半分を担う事を期待されている。洋上風力発電の中でも浮体式発電は半分以上を担う事を求められる。

(2) 浮体式洋上風力発電は急速に拡大している一方、いくつかの課題も抱えている。風車疲労寿命短縮の原因である浮体動揺は大きな課題となっている。鈴木らによれば動揺振幅が1度の場合、設計上必要な断面係数の割増量が30%、2度となると70%となることがわかっている。陸上風車の設計を大幅に変更することなく浮体式洋上風車に適用するためには浮体動揺振幅を1度程度に抑える必要があると報告された。

(3) セミサブ型浮体は波浪荷重が小さく、建設コストが比較的安く抑えられる構造形式であり、海象条件の厳しい日本沖合での設置にも適していると考えられている。波浪動揺量の低減のため、浮体構造の最適設計や風車ロータのアドバンス制御などの研究がなされてきた。浮体没水部の断面を小さくすることで復元剛性を低くし、固有周期を長周期化させた。しかしながら、これは同時に必要な積載力、復元力の確保と相対する問題であり、洋上風速の変動によって引き起こされる動揺への対応は困難である。他、風車ブレードのピッチ制御により浮体動揺のダンピングを増加させ、動揺低減にも効果があるとされている。ハードウェアの変更をせずに動揺抑制が可能であることは魅力的であるが、風車のロータ制御だけでは十分ではないと同研究グループの研究に示されている。そこでさらに斬新な考えによる動揺抑制が必要とされている。

2. 研究の目的

(1) 波浪は浮体動揺の要因である一方、エネルギー源でもあり、波力発電と洋上風力を組み合わせれば、発電コストを下げられる可能性がある。なおその上に、波力発電によって波エネルギーを吸収することで、浮体動揺の軽減にも有効であると思われる。そのような風力・波力複合発電についての試みはすでに研究されており、渡部らの研究では、浮体前後に働く波の加振力を180度の位相遅れによって相殺する設計を行った。しかしながら、波長がミスマッチ状態に陥ると浮体動揺が発生するようになる。本研究は、波力発電装置のセミアクティブ制御により浮体動揺低減に関する研究を行う。

(2) 本研究は浮体動揺の抑制と単価発電コス

トの削減の両面から考え、制御工学と流体力学を融合して複合的な検討を行う。従来両立困難である浮体式風力発電と波力発電を一体化の基礎研究を行う。将来的には、洋上ウインドファームにおいて複数の風車各々の浮体が備える波力発電装置により波浪のエネルギーを吸収し、発電の効率とシステムの稼働率の向上が期待される。

3. 研究の方法

提案システムの概観を図1に示す。ブイ1, 2は波浪エネルギーを吸収するため設置するものである。浮体のスケールダウンのため、浮体の重量の一部はスプリングKによってブイで支える。ブイと浮体の相対運動により空気の取り込みと排出が行われる。空気経路にはタービンを設置することにより波力エネルギーの抽出が可能である。このタービンの制御によりブイと浮体の相対運動のダンピングが制御可能であり、浮体動揺の低減に効果的と考えられる。

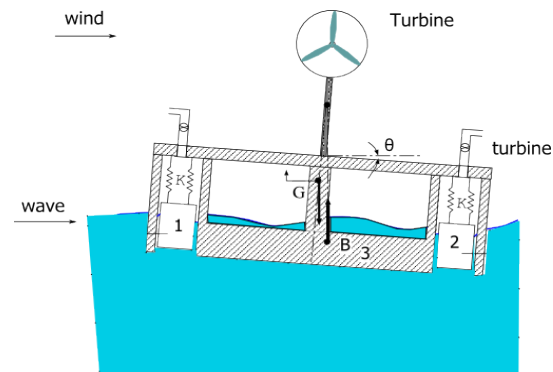


図1: 波力発電付き浮体式風車の概観

(1) ブイと浮体の一体化の設計とそのダイナミクスを考察する。まずは風車の影響を除き、簡略化したシステムを用いることで研究を行った。可変ダンピングにより波力発電機構を模擬することで設計を行う。

ブイ浮体のモデリング：制御器を開発するため、数学モデルが必要となる。モデルによるブイと浮体に働く波力とそれにより浮体のピッチ運動が分析される。

最適パラメータの設定：可制御性の理論に基づいてブイと浮体システム(風車の質量も含む)の質量比、ブイの没水部の断面積、スプリング係数Kの選定を行う。

制御器設計：導いたモデルとパラメータに基づいて浮体動揺の低減のためダンピングの制御則を開発する。

(2) 高性能3Dプリンタと工作施設の使用により風車の模型、浮体及び波力発電模型を試作する。水槽実験で(1)の設計結果を検証する。

4. 研究成果

(1) 5 MW級風車搭載用セミサブ浮体を2次元上で設計した。波力発電装置はセミサブ

浮体のサスペンションであると模擬し、数学モデルを構築した。最適制御手法でサスペンションのパラメータ設計を行った。

NREL5MW風車の搭載を想定し、先行研究を参考しながら、浮体の排水量、メガセンター及びインナーシャを設計した。それに基づいて浮体重心位置、ポンツーン及びブイの直径を計算した。

異なる規則波から浮体及びブイに働く流体力をパネル法で計算した。状態空間方程式により不規則波及び流体力をモデリングし、その特徴を抽出した。浮体運動は微小であると仮定し、浮体及びブイの運動方程式を導いた。線形化されたシステムは図2に示す。ただし、 w は白色ノイズ、 η は入射波、 f と y はパワーテイクオフで発生した力及び浮体とブイのモーションである。

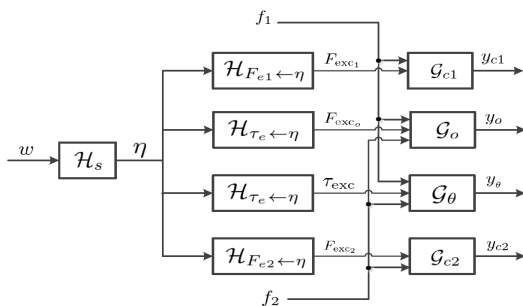


図2：線形化したシステムのブロック線図

サスペンションのパラメータ設計問題は最適フィードバック制御器設計に帰着した。図3にはその等価システムを示す。つまり、 w から θ へ低感度化されるためフィードバックゲイン K の最適設計が設計問題となる。理論展

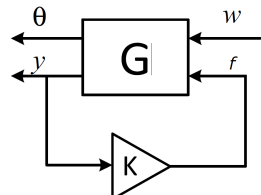


図3：等価システム

開により設計は非線形最適化プログラムになり、粒子群最適化手法(PSO)で解けられる。提案手法で設計したパラメータ(弾性係数)で浮体のピッチ運動の周波数特性が図4に示す(ケース $k=k_{opt}$)。この結果により、ピッチ運動の共振が抑制できることが検証した。

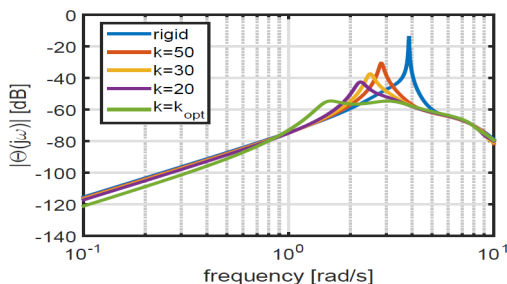


図4：浮体のピッチ運動周波数特性

(2) 波力発電装置のパワーテイクオフはセミアクティブ制御を行うと、浮体のピッチ運動はさらに低減できると考えられる。システ

ムの将来の動きを予測して最適な制御入力を決めるモデル予測制御手法を本研究への適用を検討してみた。さらに、波力発電装置は発電のみを考え、

パワーテイクオフに発生できる力と浮体ブイの相対運動との関係は図5の影部分に示される。この制約条件のもとにモデル予測制御はハイブリッドモデル予測制御に定式化でき、効率よく解けられる。

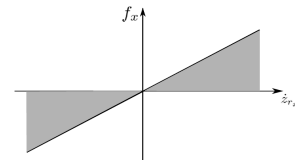


図5：パワーテイクオフ制約条件

モデルの状態を観測可能であるとの仮定のもとに、小スケール模型でシミュレーションを行った。剛体モード(ケース1：ブイと浮体との相対運動はない) パシブダンパ(ケース2)及びダンパのセミアクティブ制御(ケース3：提案手法)の各々のピッチ運動を図6に示す。提案手法の有効性を示した。

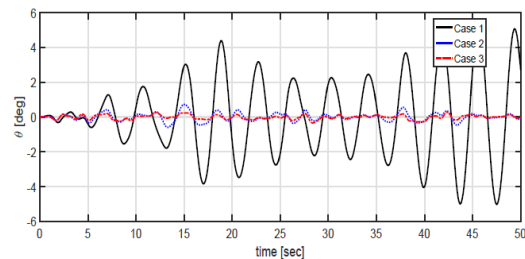


図6：剛体モード(ケース1) パシブダンパ(ケース2)及びセミアクティブ制御(ケース3)の結果

(3) 提案手法の有効性を検証するため、図7に示す実験装置を制作した。ジャイロセンサ及びリニアセンサで浮体の姿勢及び浮体ブイの相対運動が計測できた。風車と波力発電の制御システムは Intel Edison に実装し、

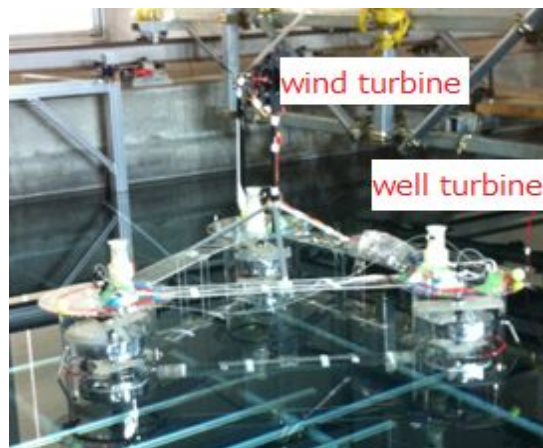


図7：浮力・波力発電複合装置模型

九州大学応用力学研究所深海水槽で実験を行った。模型の動的特性は計算の結果と一致した。しかし、流体粘性によりブイと浮体との相対運動が小さく、シミュレーション通りの結果が得られなかった。

本研究は、制御工学と流体力学を融合し、従来両立困難である浮体式風力発電と波力発電と一体化の可能性に関して検討した。理論上は波力発電装置により浮体の動揺が低減できることを示した。この技術の成立性が確認でき、洋上再生エネルギーの新しい発展が期待される。しかし、スモールスケールの実験装置には粘性摩擦の影響が大きく、理論通りの結果が得られなかった。実験装置の改善が必要となる。

今後としては、提案したシステムが3次元空間上の分析（水力と空力の分析）及び実用化に近い風力・波力複合装置の開発が課題となる。

<引用文献>

日本風力発電協会, <http://jwpa.jp>.

佐藤, 鈴木, 浮体式洋上風車の強度設計に及ぼす浮体動揺の影響に関する研究, 第28回風力エネルギー利用シンポジウム, 2006.

B. Skaare et al., "Dynamic response and control of the Hywind demo floating wind turbine," in Proc. European Wind Energy Association Annual Event, 2011.

渡部, 鈴木, 洋上型風力・波力複合発電装置, OTEC, Vol. 11, 2005.

M. Karimirad and C. Michailides, "V-shaped semisubmersible offshore wind turbine: An alternative concept for offshore wind technology," Renewable Energy, Vol. 83, pp. 126-143, 2015.

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1件)

H. Zhu, C. Hu, and Y. Liu, "Optimum Design of a Passive Suspension System of a Semisubmersible for Pitching Reduction," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 査読有, **138**(12), 121003, Jun., 2016.

DOI: 10.1115/1.4033948

[学会発表](計4件)

H. Zhu and C. Hu, "A Study on Control of Wave Energy Converter for Motion Suppression of Semisubmersible," 10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, pp. 380-385, Trondheim, 15th Sep., 2016.

H. Zhu, C. Hu, K. Liao, and Y. Liu, "Suspension Design of a Semi Sub-

mersible Platform," Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2016), OMAE2016-54347, Busan, 23rd Jun., 2016.

H. Zhu and C. Hu, "Control of a Combined Floating Platform with Wave Energy Converter," 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 福岡県中小企業振興センター, pp. 609-612, 27th May, 2016.

H. Zhu, C. Hu, and Y. Liu, "Optimal Suspension Design of a Semi-Submersible Platform," The 3rd Multi-symposium on Control Systems, 南山大学, pp. 2E3-1, 8th Mar., 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朱 洪忠 (ZHU, Hongzhong)

九州大学・エネルギー基盤技術国際教育研究センター・助教

研究者番号: 00752932

(4) 研究協力者

リュウ インイ (LIU, Yingyi)

九州大学・応用力学研究所・研究員