

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360433

研究課題名(和文) 浮体式洋上を目指した超大型風車の提案とその動解析

研究課題名(英文) Proposal of Giant Wind Turbine in Deep Floating Offshore and its Dynamic Analysis

研究代表者

荒川 忠一 (Chuichi, Arakawa)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30134472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：風車回転翼のピッチ制御による浮体式洋上風車のネガティブダンピングを抑制するための制御を提案し、実験と数値解析によって評価を行った。従来の回転数一定化を目指すピッチ制御によってネガティブダンピングが発生することを確認しつつ、この振動増幅現象を浮体の姿勢安定化制御を組み合わせるRTS制御によって、出力を保ちながら抑制することが可能であることを示した。回転数一定化制御の評価により、ネガティブダンピングが起きる状態でのスラストの分布を示し、RTS制御のその分布とは明確な差があること、定常風・規則波における解析により、RTS制御がネガティブダンピングを発生させにくい制御となっていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Wind turbines are usually controlled with the pitch control to keep the rotor speed stable and to avoid the overload. However, the control causes some troubles for the operation of floating offshore wind turbine. Specifically, the tower oscillating motion is increased, which is called as the negative damping of floating wind turbine. Negative damping problem induces the increasing of tower fatigue load. This study describes an original concept, named as RTS control, of pitch control system for floating wind turbine to control turbine rotation and tower movement. The concept of RTS is to control the blade pitch with rotor speed and tower pitch angle velocity. Simulation results are well matched to tank test. Simulations in steady wind and regular wave condition show that RTS control has the ability to avoid negative damping. It is also confirmed that RTS control avoids negative damping and reduces fatigue load of tower maintaining the power in the fluctuating wind and irregular wave.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：風力エネルギー 洋上風車 浮体式風車 ネガティブ・ダンピング 連成振動 ピッチ制御

## 1. 研究開始当初の背景

浮体式洋上風車は研究当初、実機としてノルウェーに存在するのみであり、その浮体運動の安定性などの基礎情報は皆無に等しかった。特に、本研究の対象となった、経済性を重視したスパーク型と呼ばれる浮体と風車の連成振動は、ネガティブダンピングとして機能し、システム全体の不安定性を増し、シビアアクシデントに至る恐れもあった。これらの現象を実験およびシミュレーションによって解明し、その適切な制御法を提案することが求められていた。現在、復興事業として国内での浮体式洋上風力プロジェクトが稼働中であるが、将来の洋上風力の普及に向けて本研究が大きく貢献することが期待されていた。

## 2. 研究の目的

浮体式洋上風車の課題の一つとして、動揺問題が挙げられる。浮体式風車は陸上風車や着床式洋上風車と比較して基礎が不安定であり、風車全体が動揺する。特に、陸上と同様のピッチ制御を適用すると空力によるダンピングが負となり、動揺が増幅される。この問題を浮体式風車のネガティブダンピングと呼ぶ。

浮体式風車が動揺することにより風車に流入する相対的な風速が変化する。ピッチ制御は、定格風速以上において出力を一定にするため、風をいなすように翼ピッチを変化させる制御である。このとき、スラスト力 $T$ の風速 $V$ に対する変化量 $\frac{\partial T}{\partial V}$ は負となる。このスラスト力の相対風速に対する変化は、タワー動揺の不正減衰として働くため、動揺が増幅される。図1にピッチ制御の有無によるスラストの影響を示す。

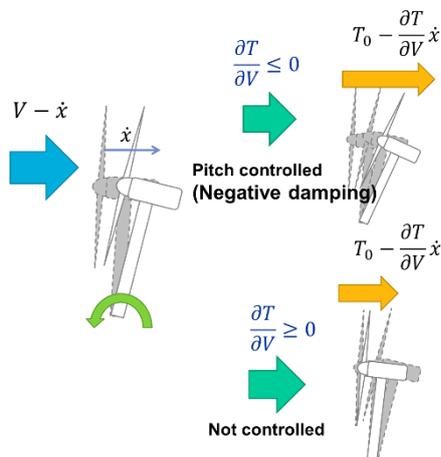


Fig. 1 Effect of thrust by pitch control

タワーの動揺が増幅されることにより、タワーの疲労荷重増加や出力の不安定化などの問題が考えられる。そのため、本研究では浮体式洋上風車に対応する、出力を安定化させつつ動揺を低減するピッチ制御を提案し、最適化を行うことを目的とする。これによりネガティブダンピングの抑制効果と、出力・タワー荷重への影響について示し、浮体式洋上風車設計への大きな指針を与える。

## 3. 研究の方法

### (1) 制御手法

従来の制御ではロータ回転数を目標値として翼ピッチ角をPID制御により変更することで出力を安定化させている。本研究ではこの回転数一定化制御に加えてタワーの角速度から、転倒と反対方向のスラストが生じるように、制御で翼を動かす角度を決めることで姿勢の安定化を目指す。本研究では、回転数一定化制御をRS制御 (Rotational speed Stabilization control)、タワー角速度から姿勢を安定化させる制御をTS制御 (Tower pitch Stabilization control)、RS制御とTS制御を組み合わせた制御をRTS制御と呼ぶ。図2にRTS制御のブロック線図を示す。

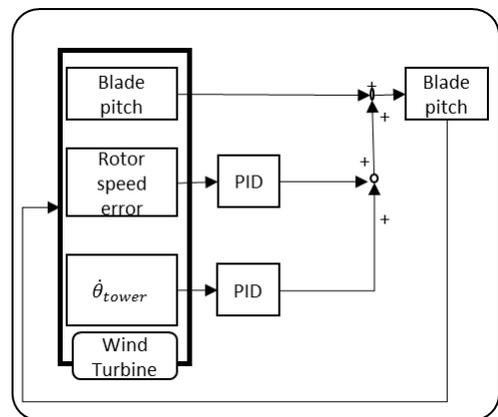


Fig. 2 Block diagram of RTS control

### (2) 解析手法

制御の比較、最適化には NREL (National Renewable Energy Laboratory) の開発する数値解析ソフト FAST を用いる。FAST により直径 1.6 m の模型風車について動的解析を行い、RTS制御の効果を示す。また、模型風車について水槽試験を海上技術安全研究所と共同で行い、数値解析・実験の両面から制御について検討する。図3に実験風景を示す。



Fig. 3 Experimental image

#### 4. 研究の成果

##### (1) 実験との比較

図4に規則波に対する浮体のピッチ方向の周波数応答関数 (RAO: Response Amplitude Operator) と風速 2 m/s において回転する翼にかかる空力スラストの比較を示す. RAO は波の波数と波高により無次元化されたタワーピッチ振幅を表す. FAST の解析による, 固有周期は実験と近い値になっており, 全体的に良い一致が見られる. また, 空力スラストの比較についても実験と FAST の結果はよく一致しており, 波による力と空力を適切に計算できていることがわかる.

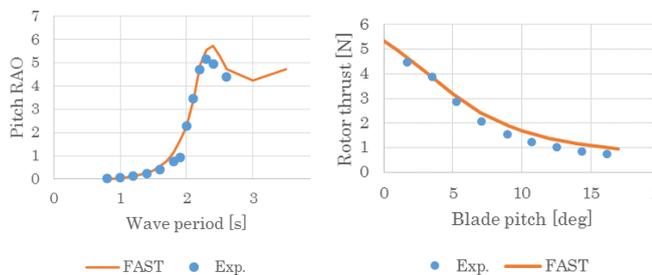


Fig. 4 RAO of tower pitch (left) and Thrust force of rotor (right)

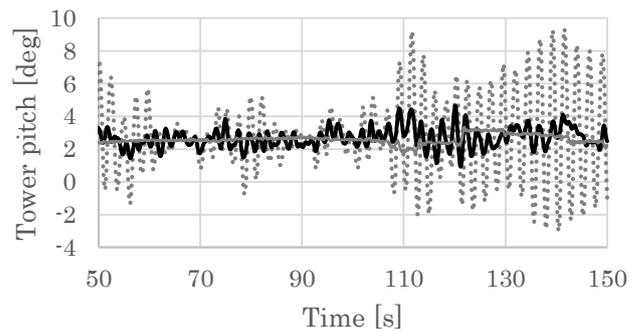
##### (2) 制御の評価

図5, 図6, 図7に計算により求めた各制御と最適化した RTS 制御の比較を示す. Fixed BP (Blade Pitch) は, 翼ピッチ角を固定した場合である. 図中の SD は標準偏差を表している. 表1に解析条件を示す.

Table 1. Condition of analysis

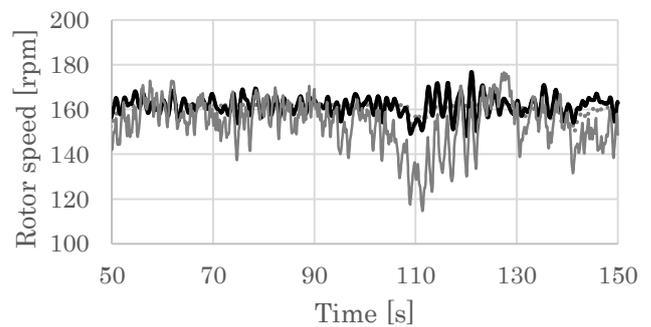
Wind speed [m/s]	2.0
Turbulence Intensity [%]	15
Wave height [m]	0.06

Wave period [s]	1.93
-----------------	------



..... RS cont. ——— RTS cont. ——— TS cont.

Fig. 5 Time shift of tower pitch angle



..... RS cont. ——— RTS cont. ——— TS cont.

Fig. 6 Time shift of rotor speed

図7より RS 制御によってタワーの動揺が翼ピッチ固定の場合と比較して増幅されており, ネガティブダンピングが発生している. また TS 安定化制御でタワー動揺は抑えられるものの, 発電量の平均値は落ちてしまっている. TS 制御はタワーの動揺を抑えることを目的としている一方で, 回転数の一定化は考えていないため, 発電量は変動してしまう. RTS 制御はこれらの制御の中間の効果を持っている. RTS 制御は出力を一定に保ちつつ, ネガティブダンピングによるタワーの動揺を低減できていることがわかる.

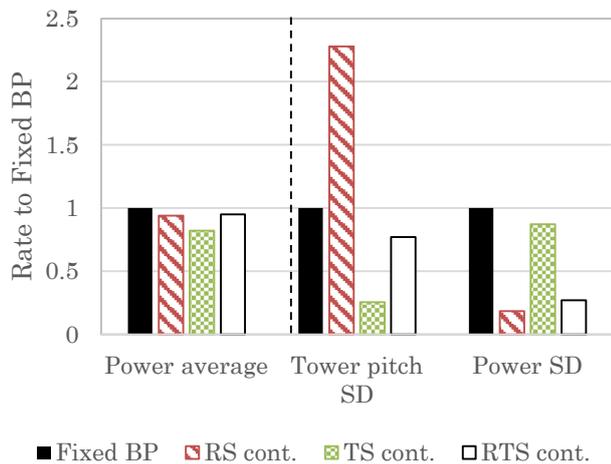


Fig. 7 Comparison of control

### (3) 成果のまとめ

本研究では浮体式洋上風車のネガティブダンピングを抑制する制御としてRTS制御を提案し、その最適化を行った。これにより、RTS制御によってネガティブダンピングを回避し、高効率かつタワーの疲労荷重を抑制できることを示した。具体的な制御法の提案により、安全・安心を図った超大型の浮体式洋上風車の設計が可能になった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] : (計 1 件)

- 1) Mitsumasa Iino, Toshiki Chujo, Makoto Iida and Chuichi Arakawa, Effect of Forced Excitation on With Turbine with Dynamic Analysis in Deep Offshore Wind in addition to Japanese status of Offshore Projects, Energy Procedia, 24, 2014, 11-17.

[学会発表] : (計 19 件)

- 1) Yuta Tamagawa, Makoto Iida, Chuichi Arakawa et al, "Efficient pitch control to reduce the tower motion of floating wind turbine by dynamic analysis", European Wind Energy Association, Barcelona, 2014.3.11, Barcelona, Spain
- 2) Takeshi Kamio, Makoto Iida, Chuichi Arakawa, "Comparison of les and observation on the turbulence characteristics of a complex terrain", Proceedings of EWEA 2014, 2014.3.11, Barcelona, Spain
- 3) 菊池亮太, 飯野光政, 飯田誠, 荒川忠一,

“風速変動時の応答性を考慮した小形風車の実験的シミュレーション”, 第35回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.415-418, 2013.11.13, 東京

- 4) 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一, "波力発電機・浮体式風車ハイブリッドシステムの動的解析による姿勢安定化の検討", 第35回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.335-338, 2013.11.13, 東京
- 5) 中條 俊樹, 羽田 絢, 二村 正, ロータ回転が洋上風力発電浮体の減衰へ与える影響について, 第35回風力エネルギー利用シンポジウム, 2013.11.13, 東京
- 6) 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一, "入射波特性に基づく波浪ブイ式波力発電機の最適制御", 日本機械学会 第91期流体力学部門講演会論文, 2013.11.10, 福岡
- 7) Yuta Tamagawa, Makoto Iida, Chuichi Arakawa, "EFFICIENT PITCH CONTROL TO REDUCE THE TOWER MOTION OF FLOATING WIND TURBINE BY DYNAMIC ANALYSIS", EWEA OFFSHORE 2013, 2013.11.20, Frankfurt, Germany
- 8) Yohei Kobayashi, Hayaki Matsui, Takao Muromaki, Chuichi Arakawa, MODEL EXPERIMENTS ON NEGATIVE DUMPING OF AN OFFSHORE FLOATING WIND TURBINE, EWEA offshore 2013, 2013.11.20, Frankfurt, Germany
- 9) 中條 俊樹, 羽田 絢, 石田 茂資, 二村 正, Experimental Study for Floating Offshore Wind Turbine with Blade Pitch Control, 海洋再生可能エネルギー国際シンポジウム, 2013.10.29, 東京
- 10) 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一, "動的解析による波力発電機・浮体式風車のハイブリッドシステムの姿勢安定化の検討", 日本流体力学会年会2013講演論文集(CD-ROM), 2013.9.13, 東京
- 11) 菊池亮太, 飯野光政, 飯田誠, 荒川忠一, "系統連系型小形風車の変動風況における発電シミュレーション", 電気学会電力技術研究会資料, 2013.9.13, 北九州市
- 12) 池田大夢, 飯田誠, 荒川忠一, "MexNext風車交流の数値解析", 日本機械学会2013年度年次大会講演論文集(CD-ROM), 2013.9.11, 岡山
- 13) 小林洋平, 荒川忠一, "動揺による浮体式洋上風車出力の減少に関する研究", 日本機械学会2013年度年次大会講演論文集(CD-ROM), 2013.9.11, 岡山
- 14) 玉川雄太, 飯田誠, 荒川忠一, "浮体式風

- 車の姿勢・出力安定化に向けたピッチ制御の研究”，日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集（CD-ROM），2013.9.11，岡山
- 15) 神尾武史，飯田誠，荒川忠一，小垣哲也，”風車設計のための複雑地形乱流風の LES シミュレーションによるスペクトル解析”，日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集（CD-ROM），2013.9.11，岡山
- 16) 神尾武史，飯田誠，荒川忠一，小垣哲也，”風車設計のための複雑地形乱流風の LES シミュレーションによるスペクトル解析”，日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集（CD-ROM），2013.9.11，岡山
- 17) 中條 俊樹，Effect of Blade Pitch Control for Floating Offshore Wind Turbine，日韓共催海洋再生可能エネルギー利用セミナー，2013.8.30，東京
- 18) Ryota Kikuchi, Mitsumasa Iino, Makoto Iida, Chuichi Arakawa, ”PROPOSAL OF GRID-CONNECTED SMALL WIND TURBINE SIMULATOR BASED ON AEROELASTIC DYNAMIC MODELING”, Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Summer Meeting, 2013.7.10, Invlane village, USA
- 19) 小林洋平，藤本啓佑，岩井雄哉，荒川忠一，1 自由度を持つピッチ制御可能な風車模型のネガティブダンピング，第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム，2013.6.21，千葉

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荒川 忠一 (ARAKAWA Chuichi)，東京大学・大学院工学系研究科・教授，研究者番号：30134472

### (2) 研究分担者

飯田 誠 (IIDA Makoto)，東京大学・先端科学技術研究センター・准教授，研究者番号：40345103

小林 洋平 (KOBAYASHI Yohei)，舞鶴工業高等専門学校・准教授，研究者番号：50548071

井上 俊司 (INOUE Shunji)，独立行政法人海上技術安全研究所・洋上再生エネルギー開発系，系長，研究者番号：50575157