

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05016

研究課題名(和文) 垂直軸型浮体式洋上風力発電システムの空力-水力-弾性連成挙動と制御方策の解明

研究課題名(英文) Elucidation of aero-hydro-elastic coupled behavior and control strategy of floating offshore vertical axis-type wind turbine-generator systems

研究代表者

涌井 徹也 (Wakui, Tetsuya)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40339750

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)：風力発電の普及促進を図るために垂直軸型タービンを用いた浮体式洋上風力発電システムの開発を目指して研究を行った。垂直軸型風力タービンは風向変動の影響を受けず、低重心であることから、浮体式システムに用いた場合の利点が多い。しかし、ローター回転中にタービントルクや空力荷重などが大きく変動するために、風力タービン、浮体、制御器の動特性が複雑に干渉することが課題となっている。本研究では、垂直軸型浮体式洋上風力発電システムを対象とした空力-水力-係留力-制御連成解析モデルを構築し、その連成挙動を解明した。さらに、発電性能および疲労荷重特性を向上させるための独立翼ピッチ操作方策を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

垂直軸型風力タービンは風向変動の影響を受けず、低重心であることから、今後の普及が期待される浮体式風力発電システムに用いた場合の利点を多く有するが、ローター回転中のタービントルクや空力荷重の変動が大きいために、その導入可能性が明らかにされていなかった。本研究では、空力-水力-係留力-制御連成解析モデルを構築し、その連成挙動の分析を通して、高風速域での定速運転時の空力荷重変動の低減が重要であることを明らかにした。さらに、独立翼ピッチ操作を導入することで空力荷重変動が大幅に減少できることを明らかにし、垂直軸型浮体式洋上風力発電システムの導入可能性を向上させる学術的知見を提示できた。

研究成果の概要(英文)：The present study focused on a vertical-axis type floating offshore wind turbine-generator system to promote the installation of offshore wind power generation. Vertical-axis type wind turbine has advantages for floating offshore systems, such as power generation mechanism independent of wind direction and low center of gravity. However, this system has a complicated dynamic behavior due to significant variations in the aerodynamic characteristics during rotation. Thus, the aero-hydro-elastic-control coupled simulation model of vertical-axis type floating offshore wind turbine-generator systems was developed and then the dynamic behavior of a 2-MW system using a three-blade straight-wing type vertical axis wind turbine. Moreover, the individual blade pitch manipulation algorithm was developed to reduce the aerodynamic loads and enhance the power generation capability.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：風力発電 垂直軸風車 洋上風力 連成解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

「エネルギー基本計画」に掲げられたように、再生可能エネルギーの導入加速は国内外で強く求められている。その中でも事業者が経済性を確保できる可能性が高い風力発電は大規模な導入が期待されている。今後は立地条件の制約から洋上での発電に移行していくが、日本のように大水深海域が広い地域では、浮体の上に風力発電設備を設置する浮体式が有効となる。浮体式システムは風や波によって浮体の動揺が誘起され、主要な機械要素に作用する疲労荷重が増大することから、浮体の安定化技術の確立が重要課題となっている。

浮体式洋上風力発電の研究や実証試験の多くは、陸上設置式で普及が進む水平軸型タービンを対象としている。しかし、風力タービン、増速機、発電機などの重量物を浮体最上部に設置するため、先進的な制御方を導入しても浮体の安定性の向上には限界がある。一方、図1に示すような垂直軸型タービンを用いる場合(以後、垂直軸型浮体式システム)には、風向の影響を受けずに出力を発生できるだけでなく、ジャイロ効果と重量物を低位置(浮体の動揺中心付近)に設置できることも相俟って浮体の高い復元性が期待できる。しかし、回転中に空力荷重が大きく変動することで、風力タービンの空力-弾性振動特性、浮体の動揺特性、発電機トルク操作による回転数や浮体動揺の制御特性が複雑に干渉するため、その導入可能性は明らかにされていなかった。したがって、複雑な連成挙動を解明し、発電性能や主要機械要素の疲労荷重特性を向上させる制御方を確立することができれば、垂直軸型浮体式システムの導入可能性の向上に大きく貢献できると考えた。垂直軸型浮体式システムの研究は国内外で始められていたものの、モデル実験や風力タービンを剛体と見なした空力-水力学解析による浮体の動揺評価が行われていたに留まり、連成挙動や制御方策に関する学術的な知見は得られていなかった。

### 2. 研究の目的

垂直軸型浮体式洋上風力発電システムを対象とした空力-水力-係留力-制御連成解析モデルを構築し、数値解析を通してその連成挙動を解明する。さらに、風速や波高の不規則変動下での発電性能および疲労荷重特性を向上させる制御方を確立することで、垂直軸型浮体式風力発電システムの導入可能性を高めるための基礎的かつ学術的な知見を得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 対象システム

垂直軸型浮体式洋上風力発電システムは、図1に示すように、垂直軸型風力タービン・発電機がスパー型浮体に接続され、浮体は係留ラインを介して海底に固定される。風速と回転数に応じた風力タービンの空力荷重、波力、および係留力が作用して浮体は動揺する。また、浮体動揺に応じてタービンへの流入風速が変動することで空力特性が変化するため、浮体式システムは複雑な連成挙動を示す。

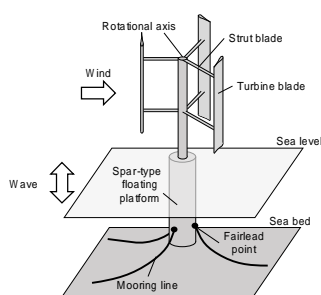


図1 垂直軸型浮体式洋上風力発電システム

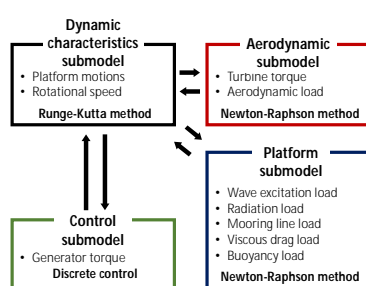


図2 連成シミュレーションモデル

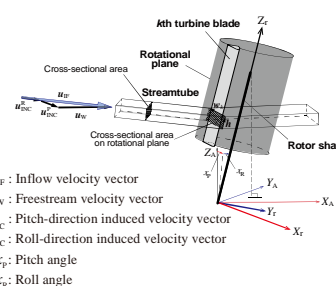


図3 空力サブモデル

#### (2) 連成シミュレーションモデル

空力-水力-係留力連成解析モデルの概要を図2に示す。連成解析モデルは垂直軸型風力タービンの空力サブモデル、浮体サブモデル、制御サブモデル、および動特性サブモデルより構成される。浮体動揺に伴う回転軸の傾斜を表現するため、図3に示すように、空間上に固定された絶対座標系( $X_A$ 軸,  $Y_A$ 軸,  $Z_A$ 軸)と、ローター回転軸長手方向を $Z$ 軸とする相対座標系( $X_R$ 軸,  $Y_R$ 軸,  $Z_R$ 軸)を定義する。ローター前方風速が $X_A$ 軸方向より流入するものとする、相対座標系は絶対座標系から浮体のロールおよびピッチ方向変位だけそれぞれ回転させた座標系となる。

サブモデル間の強連成解析を行う場合には、非線形連立微分代数方程式を解くことになり、計算負荷が非常に高い。そこで、サブモデルの計算を個別に行い、変数をサブモデル間で引き渡す弱連成手法を採用する。空力サブモデルおよび浮体サブモデルの連立代数方程式はニュートン-ラフソン法を用いて数値的に解く。また、動特性サブモデルの微分方程式はルンゲ-クッタ法を

用いて解く。

### (3) 計算条件

垂直軸型風力タービンは3枚の直線翼（NACA0015翼型）を有し、ローター直径は86 m、ローター高さは103 mとする。発電機の定格出力は3400 kWとする。ソリディティやアスペクト比などの風力タービンの主要諸元は、複数の設計荷重ケースにおける空力荷重解析に基づいて決定している。スパー型浮体の諸元はOC3-Hywind spar-buoyモデルに基づいて決定する。喫水は120 m、直径は9.4 mとし、静水面から深さ70 mの地点に3本の係留ラインが接続されているものとする。

## 4. 研究成果

### (1) 空力解析モデルの開発

浮体の3次元かつ動的な動揺に起因する垂直軸型タービンへの流入風速の変化を考慮した空力解析モデルを構築した。研究代表者がこれまでに構築した流管理論に基づく静的な回転軸傾斜下での空力解析モデルを改良し、流入速度に浮体（ローター回転軸）の傾斜速度を考慮できるようにした。構築したモデルを用いて、浮体運動を模擬した回転軸の強制動揺下での直線翼垂直軸型タービンの空力特性の解析を行い、回転軸のピッチおよびロール方向の動揺が出力特性に与える影響を明らかにした。

### (2) 連成シミュレーションの構築

浮体式垂直軸型風力発電システムの空力-水力-係留力連成シミュレーションモデルを構築し、システムの連成挙動を分析した。連成解析モデルは垂直軸型風力タービンの空力サブモデル、浮体サブモデル、離散制御器サブモデル、および動特性サブモデルより構成される。浮体サブモデルでは、浮体変位に応じた準定常状態での浮体外力を絶対座標系基準で計算し、係留力、粘性抗力、浮力を対象とした。サブモデル間の強連成解析を行う場合には、非線形連立微分代数方程式を解くことになり、計算負荷が非常に高い。そこで、サブモデルの計算を個別に行い、変数をサブモデル間で引き渡す弱連成手法を新たに開発した。

### (3) 連成挙動の解明

定格風速以上の高風速域で直線翼垂直軸型風力タービンを用いた浮体式風力発電システムの連成挙動解析を行った。ローター回転数の遅れ特性とそれに伴う空力特性の変化が浮体変位の動特性に与える影響は大きいものの、浮体変位からの空力特性とローター特性への影響は小さいことを明らかにした。さらに、流入風速の予見情報に応じて回転数フィードバック制御設定値をフィードフォワード操作する制御方を開発し、高風速域において回転数と浮体動揺を低減できることを明らかにした。

### (4) 独立翼ピッチ操作方策の開発

浮体式垂直軸型風力発電システムでは、高風速域において流入風速やアジマス角に応じてタービン翼の迎え角が大きく変動するため、ローター回転中のタービントルクや空力荷重の変動が顕著になる。そこで、風速やアジマス角に応じたタービン翼の独立翼ピッチ操作方策を開発した。垂直軸型風力タービンの空力荷重は風速やアジマス角に対して強い非線形特性を有することから、翼ピッチ軌道のメタヒューリスティック最適化計算と空力解析を組み合わせることで、ローター回転中の空力荷重の変動を最小化する翼ピッチ軌道を探索した。さらに最適翼ピッチ軌道に基づく独立翼ピッチ操作を導入した場合の空力荷重変動の抑制効果を昨年度構築した空力-水力-係留力連成シミュレーションモデルを用いて明らかにした。

### (5) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

垂直軸型浮体式風力発電設備をシステムとして捉えた場合の空力-水力-係留力-制御連成挙動については、これまで国内外でほとんど先行研究の報告が無い。本研究で開発した空力-水力-弾性-制御連成解析モデルとモデルを用いて解明した連成特性は極めて高い学術的独自性を有する。また、連成挙動解析を通して、垂直軸型浮体式風力発電システムでは高風速域における空力荷重変動の抑制が導入可能性を高めるためには不可欠であることを明らかにした。この知見に基づいて独立翼ピッチ操作方策を開発することができたのは、当初予期していなかった大きな成果である。

### (6) 今後の展望

本研究で開発した連成シミュレーションモデルにより、様々な設計荷重ケースにおける疲労荷重特性を評価できるようになった。連成シミュレーションに基づく垂直軸型浮体式風力発電システムの最適設計手法を開発し、導入可能性の高いシステム設計を進めていくことが今後の展望として期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Wakui Tetsuya, Nagamura Atsushi, Yokoyama Ryohei   | 4. 巻<br>173           |
| 2. 論文標題<br>Stabilization of power output and platform motion of a floating offshore wind turbine-generator system using model predictive control based on previewed disturbances | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Renewable Energy   | 6. 最初と最後の頁<br>105-127 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.renene.2021.03.112  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Wakui Tetsuya, Nagamura Atsushi, Yokoyama Ryohei   | 4. 巻<br>1               |
| 2. 論文標題<br>Stabilization of power output and platform motion of a floating offshore wind turbine-generator system using model predictive control based on previewed disturbances | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Proc. of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems                                    | 6. 最初と最後の頁<br>1327-1339 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Tetsuya Wakui, Atsushi Nagamura, Ryohei Yokoyama   | 4. 巻<br>PO.040     |
| 2. 論文標題<br>Model predictive control of floating offshore wind turbine-generator systems based on preview of wind speed and wave height | 5. 発行年<br>2019年    |
| 3. 雑誌名<br>Proc. of the WindEurope Offshore 2018  | 6. 最初と最後の頁<br>1-13 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし  | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 長村篤, 横山良平                                      |
| 2. 発表標題<br>風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御（制御性能に対する予見誤差の影響分析） |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会                                |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐野祥太, 涌井徹也, 横山良平                 |
| 2. 発表標題<br>独立翼ピッチ操作による大形垂直軸型風力発電システムの空力荷重低減 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会関西支部第96期定時総会講演会            |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 長村篤, 横山良平                                     |
| 2. 発表標題<br>風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御（荷重を出力とした内部モデルの導入） |
| 3. 学会等名<br>日本風力エネルギー学会第42回風力エネルギー利用シンポジウム                      |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 長村篤, 横山良平   |
| 2. 発表標題<br>風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御（制御性能に対する風況および海況の影響分析） |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会2020年度年次大会  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 長村篤, 横山良平                   |
| 2. 発表標題<br>風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御 |
| 3. 学会等名<br>日本風力エネルギー学会第41回風力エネルギー利用シンポジウム    |
| 4. 発表年<br>2019年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 佐野祥太, 横山良平                   |
| 2. 発表標題<br>大形垂直軸型風力発電システムの年間運転性能に対する設計条件の影響分析 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会2019年度年次大会                   |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 長村篤, 横山良平               |
| 2. 発表標題<br>浮体式洋上風力発電システムの閉ループ挙動に基づく動特性同定 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会2019年度年次大会              |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 西岡拓哉, 横山良平               |
| 2. 発表標題<br>回転軸動揺下での大形垂直軸型風力タービンの空力特性解析    |
| 3. 学会等名<br>日本風力エネルギー学会第40回風力エネルギー利用シンポジウム |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 西岡拓哉, 横山良平                          |
| 2. 発表標題<br>回転数設定値のフィードフォワード操作に基づく大形垂直軸型風力発電システムの出力制御 |
| 3. 学会等名<br>日本風力エネルギー学会第40回風力エネルギー利用シンポジウム            |
| 4. 発表年<br>2018年                                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>涌井徹也, 宮長大輔, 横山良平   |
| 2. 発表標題<br>モデル予測制御による浮体式洋上風力発電システムの出力変動および動揺抑制(内部モデルにおけるゲインスケジューリングの導入) |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会2018年度年次大会   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tetsuya Wakui, Takuya Nishioka, Ryohei Yokoyama  |
| 2. 発表標題<br>Dynamic Load Analysis of a Large-Scale Vertical Axis Wind Turbine-Generator System Using Aero-elastic-control coupled simulation |
| 3. 学会等名<br>Grand Renewable Energy 2018 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)  | 備考 |
|-------|--------------------------------|------------------------|----|
| 研究協力者 | 西岡 拓哉<br><br>(Nishioka Takuya) | 大阪府立大学・大学院工学研究科・博士前期課程 |    |
| 研究協力者 | 長村 篤<br><br>(Nagamura Atsushi) | 大阪府立大学・大学院工学研究科・博士前期課程 |    |
| 研究協力者 | 佐野 祥太<br><br>(Sano Shota)      | 大阪府立大学・大学院工学研究科・博士前期課程 |    |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|