

称号及び氏名 博士（工学） 岩松 幸花

学位授与の日付 2023年3月31日

論文名 「垂直軸風車を複数機搭載した浮体式風車の
回頭運動及び弾性応答に関する研究」

論文審査委員 主査 片山 徹
橋本 博公
馬場 信弘
二瓶 泰範
副査 鈴木 英之（東京大学大学院工学系研究科）
副査 居駒 知樹（日本大学大学院理工学研究科）
副査 飯島 一博（大阪大学大学院工学研究科）

論文要旨

現在の洋上風車の多くは水平軸風車（HAWT）を搭載している。その理由として、簡易的な構造である点と陸上風車としての実績がある点が挙げられる。しかし、HAWTの場合、ナセルが上部にあることによって高重心になりやすい点や複雑な制御機構を要する点は浮体構造物にとってデメリットにもなり得る。また、既存の風車の多くは一基の浮体式風車に多点係留のカテナリー係留が主流のため、建設コストも高額になりやすい。そこで、本研究では垂直軸風車（VAWT）を複数機搭載した一点係留（SPM）の浮体式風車を提案する。風に対して無指向性のVAWTと係留を中心に旋回可能なSPMを組み合わせることで、ヨー制御を必要とすることなく、VAWTは常に風に対して追従することが可能である。このように、一つの浮体に二基のVAWTを搭載することで、係留コストや占有面積の削減が見込める。しかし、VAWTを複数機搭載した浮体式風車の回頭運動や設計荷重は具体的には明らかにされていない。従って、本研究ではVAWTを複数機搭載した浮体式風車の回頭運動及び弾性応答を明らかにすることを目的とする。本論文における検証ポイントは三つある。一つ目は、小型VAWTの代表であるクロスフロー風車を二基搭載した浮体式風車の回頭運動に数値シミュレーションからアプローチしたことである。二つ目は、VAWTの大型化に適しているダリウス風車を二基搭載した二種類の浮体式風車の回頭運動を水槽試験から調査したことである。三つ目は、Real-time hybrid model 試験（ReaTHM）と呼ばれる手法を用いた水槽試験と風車-浮体弱連成解析ソフトUTWindにより、VAWTを二基搭載した浮体式風車の定格風速及び荒天時の弾性応答を調査したことである。以下に、本論文における構成を示す。

第一章には、本論文全体の緒論を述べる。

第二章は、クロスフロー風車を搭載した多基連結型浮体式風車“Multi-connection cross-flow VAWTs”の回頭運動について述べる。この浮体式風車は、養殖場の電力課題を解決するために開発され、係留浮体を中心に独立した二基のたらい型風車浮体が一直線上に並んでいる新しい浮体式風車である。係留は緊張係留とし、係留浮体を中心に浮体式風車が回頭できる機構を介して取り付けた。Multi-connection cross-flow VAWTsは、先行研究で行われた風波中動揺試験により、風追従性能は確認されている。しかし、数値シミュレーションからは回頭運動を再現できておらず、回頭運動のメカニズムは解明されていない。従って、第二章では、Multi-connection cross-flow VAWTsの回頭運動を数値シミュレーション上から精度よく再現し、多基連結型浮体式風車の回頭運動を力学的観点から明らかにすることを目的として研究を行い、以下を実施した。

- ① 強制動揺試験を実施し、付加慣性モーメント及び slow-drift damping の算出
- ② 緊張係留による係留索張力の動的計算
- ③ ルンゲ・クッタ・ギル法を用いた数値シミュレーションの構築

回頭運動を精度良く再現するためには、風車浮体に作用する付加慣性モーメント及び slow-drift damping が重要であり、これらは強制動揺試験より求めることができる。本試験では、風車浮体を用いて回流水槽で実施した。荷重は模型に設置された検力計によって計測され、ヨー運動制御装置を介して水槽に固定されている。このヨー運動制御装置によって、風車浮体は任意の角周波数で回頭するため、Multi-connection cross-flow VAWTsの回頭運動を模擬することを可能にした。

回頭運動の数値シミュレーションにおいては、強制動揺試験と数値計算から外力を算出し、力学モデルに基づいた運動方程式を解くプログラムを構築した。数値シミュレーション上では、風車に対して平行の風荷重、波荷重、係留力をモデル化し、風車に対して垂直方向の風荷重、付加慣性モーメント及び Slow-drift damping を係数として扱っている。

構築した数値シミュレーションプログラムの結果と先行研究の風波中動揺試験の回頭運動の結果を比較した。本研究では、風荷重のみ、波荷重のみ、風及び波荷重の両方が Multi-connection cross-flow VAWTs に作用した場合について検証し、得られた結果は以下である。

- ・ 本試験模型は必ず風に正対した位置に収束し、その位置は左右の風車に作用する風荷重が釣り合う位置であった。
- ・ 波浪のみを作用させた場合、浮体はほとんど回頭しないため、本試験模型は波荷重の影響はほとんど受けない。
- ・ 風及び波荷重を作用させた場合、水槽試験の結果と数値シミュレーションの結果は概ね一致し、計算精度は5%程度の誤差であった。

第三章は、ダリウス風車を複数機搭載した浮体式風車の回頭運動について述べる。垂直軸風車の大型化を想定した場合、第二章で用いたクロスフロー風車より、ダリウス風車の方が適している。そのため、第三章では、ダリウス風車を二基搭載した浮体式風車を二種類設計し、水槽試験から風波中における回頭運動を調べることを目的とし、以下を実施した。

- ① 風車設計ソフト“QBlade”を用いたダリウス風車の設計
- ② ダリウス風車を二基搭載可能なセミサブ型浮体式風車の設計
- ③ 1/100 スケール模型を用いた風荷重試験及び風波中動揺試験

クロスフロー風車からダリウス風車に変更するために、風車設計ソフト“QBlade”を用いて実機スケールのダリウス風車を設計した。本研究では、定格風速 12 m/s のときに定格出力 2 MW となるよう、パラメータスタディを実施している。その結果、翼型 NACA0018、ロータ径 80 m、パワー係数 0.48 のサンディア型ダリウス風車を採用した。

セミサブ型浮体は、堅牢性を重視した Double rotor-VAWTs と第二章のコンセプトに近い Multi-connection darrieus VAWTs を設計した。Double rotor-VAWTs は、直角二等辺三角形の形状をしており、直角の頂点に係留点としてタレット係留を設け、鋭角の二か所にダリウス風車を一機ずつ搭載している。Multi-connection darrieus VAWTs は、第二章同様に独立した係留浮体と二基の風車浮体が一直線上に並んでおり、第二章と異なる点は細長部材を用いたセミサブ型浮体である

点である。

水槽試験では、風荷重試験及び風波中動揺試験を実施した。風荷重試験においては、浮体式風車が回頭運動する範囲に製作したダリウス風車模型を設置して、風荷重を計測した。風波中動揺試験においては、風単独試験及び波単独試験を実施し、浮体運動を計測した。その結果を以下に示す。

- ・ 風荷重試験より、風車模型を一基のみ設置した場合と二基並列させた場合の結果を比較すると、一基当たり作用する風荷重は二基並列させると減少することが分かった。この結果より、ダリウス風車を二基設置すると、お互いに干渉し、風荷重に影響することが分かった。
- ・ 波単独試験において、Double rotor-VAWTs は波下側に向かって回頭したが、Multi-connection darrieus VAWTs は初期位置からほとんど動かなかつた。Double rotor-VAWTs を構成する円筒部材は最大直径 0.10 m に対して、Multi-connection darrieus VAWTs は最大 0.06 m の細長円筒部材である。そのため、Multi-connection darrieus VAWTs は波力をほとんど受けなかつたと考えられる。
- ・ 風単独試験において、Double rotor-VAWTs は全ての初期位置において風下側に回頭して収束することが確認できた。一方、Multi-connection darrieus VAWTs は、回頭運動が収束する場所が二か所生じていた。これは、風荷重試験の結果より、回頭運動が収束する場所で左右の風車に作用する風荷重の大きさが二か所に入れ替わっていたことに起因していることが分かった。即ち、垂直軸風車を二基搭載した浮体式風車は風車に作用する風荷重が釣り合う位置まで回頭するといえる。

第四章は、Double rotor-VAWTs の弾性応答について述べる。洋上風車の設計において、風車と浮体の連成解析は必須とされており、本研究で提案する浮体式風車においても例外ではない。第三部では、堅牢性を重視して設計された Double rotor-VAWTs を基に、垂直軸風車を複数機搭載した浮体式風車の弾性応答を調べることを目的として、以下を実施した。

- ① Double rotor-VAWTs の 1/100 スケール弾性模型を用いた水槽試験
- ② 風車-浮体弱連成応答解析ソフト”UTWind”と風車設計ソフト”QBlade”を組み合わせた垂直軸風車を二基搭載した浮体式風車の弾性応答解析

ここで、水槽試験及び弾性応答解析ともに風速条件は定格時を風速 12 m/s 及び荒天時を風速 42 m/s としている。

水槽試験では、製作した弾性模型を用いて、数値シミュレーションと模型試験を組み合わせた ReaTHM 試験という手法を用いた。通常、洋上風車模型を用いた水槽試験では、風車ロータに作用する推力をレイノルズ数、浮体に作用する水面下の荷重はフルード数に則って相似則を合わせる。しかし、レイノルズ数とフルード数の相似則を同時に満たすことは困難であるとされており、この課題を解決する方法が ReaTHM 試験である。ReaTHM 試験では、風車ロータの推力はダクテッドファンによって制御し、水面下の荷重は従来通りに水槽で発生させることで二つの相似則を満たした。

弾性応答解析においては、風車設計ソフト”QBlade”から出力したダリウス風車の推力を水平軸風車用に開発された風車-浮体弱連成応答解析ソフト”UTWind”に入力値として与えて考慮した。以下に、水槽試験と弾性応答解析から得られた結果を示す。

- ・ 曲げモーメント及び運動応答を比較すると、すべての結果で概ね傾向は一致した。
- ・ Pontoon に発生する曲げモーメントに対して、風車のスラストの影響を与えることが分かった。また、長周期になるとスラストの影響も大きくなる。

第五章では、本論文の結論を述べる。

以上、本論文では、VAWT を二基搭載した Multi-connection VAWTs 及び Double rotor-VAWTs の回頭運動及び弾性応答について調査した。Multi-connection VAWTs を対象とした回頭運動の検証では、数値シミュレーションの精度は誤差 5%程度となり、回頭運動を力学的観点から明らかに

できたといえる。また、Double rotor-VAWTs の弾性応答においても、水槽試験と数値シミュレーションは良好な結果を示した。

審査結果の要旨

本研究では浮体式風車において複数機の垂直軸風車を浮体に搭載し、全ての風車が常に風に正対可能にする為に一点係留方式を採用した浮体式風車を提案している。これまで多数の浮体式風車が研究開発されてきたが、多数機の風車を搭載した一点係留方式の浮体式風車は研究事例がなかったと言える。本研究では一点係留において重要となる回頭挙動、多数機搭載において重要となる弾性応答挙動を明らかにしており、以下の成果を得ている。

- (1) クロスフロー風車を搭載した2機の風車浮体と独立した係留浮体で構成される新しい浮体式風車を提案した。この浮体式風車の回頭挙動をシミュレート可能にするために4自由度の運動方程式を解く時刻歴プログラムを開発し、回頭挙動を明らかにした。回頭運動の力学モデル構築において特に重要となるのが、風向きに対して垂直方向の風車に生じる風荷重を正確に評価することであることを明らかにした。
- (2) クロスフロー風車より高効率なダリウス風車を2機搭載した2種類のセミサブ浮体を設計・製作した。2種類の内一方の浮体は堅牢性を重視したセミサブ浮体を用いており、もう一方はセミサブ浮体の2機を一点で係留する方式である。風荷重試験及び風波中動揺試験を実施することにより、これらの浮体式風車の運動の特徴を明らかにした。
- (3) ダリウス風車を2機搭載したセミサブ浮体を用いた浮体式風車の弾性応答を水槽試験および弾性応答解析により明らかにした。水槽試験において、想定するセミサブ実機の剛性をスケールダウンすることにより浮体の弾性応答を調べることを可能にした。また、風車に作用する風荷重については予め計算した風荷重をダクテッドファンの制御により再現する ReaTHM 試験を確立した。
- (4) 弾性応答解析シミュレーションに垂直風車の風荷重を計算し組み合わせることにより、風・波の中での弾性応答解析を可能にした。弾性応答解析シミュレーションは水平軸風車を搭載した浮体式風車の弾性応答解析で実績がある UTWind であり、垂直軸風車の荷重計算は QBlade を用いた。弾性応答解析と水槽試験の結果は類似しており、良好な結果が得られた。即ち、QBlade から出力したスラストを用いることで UTWind においても垂直軸風車を搭載した浮体式風車の弾性応答解析を行うことができるといえる。

以上の諸成果により、これまで明らかにされてこなかった垂直軸風車を多数機搭載した浮体式風車の回頭運動及び弾性応答を明らかにしたと言える。加えて回頭時の力学モデルや試験方法、弾性応答解析手法についても構築しており関連分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。