

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：54102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14270

研究課題名(和文) 洋上風力発電に適した浮体式両端支持垂直軸型風車の開発

研究課題名(英文) Development of offshore floating vertical axis wind turbines supported at both ends.

研究代表者

渡辺 幸夫 (Yukio, Watanabe)

鳥羽商船高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20332033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい洋上風力発電方式として浮体式両端支持垂直軸型洋上風車を提案した。

垂直軸型風車については、一般的な直線翼型のタイプとヘリカル式の双方についてCFD解析を実施し、ヘリカル式(回転軸に対して60deg翼が傾斜したもの)がトルク変動が小さくなることが分かった。また、両端支持垂直軸風車を双胴船タイプの浮体に設置した模型を作製し、風洞水槽にて風上追従性と動揺特性の計測を実施した。この結果、双胴船タイプの浮体を一点係留することで任意の角度から風が流入しても、風上を追従することが判明した。また、ヘリカル式垂直軸型風車を洋上風車とすることで、動揺が抑えられる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, offshore floating vertical axis wind turbines(VAWT) supported at both ends as a new offshore wind power device is suggested. Initially, static simulations are carried out to characterize the behavior of the turbine blade considering rigid rotations with steps of 15deg by using Computational Fluid Dynamics(CFD). It can be seen that the curve of the helical (60deg) blade is smoother than that of the Straight blade torque. In addition, the scale model which sets up both ends support vertical axis wind turbine to the floating body of the catamaran type is carried out windward flutter characteristics and the measurement of fluctuation response characteristic with wind-wave tank.

As a result, the suggested device in which direction of a wind turbine constantly and automatically faces toward a direction opposite to a windward. And we showed the possibility to decrease the heaving motion of the float of offshore wind power applied helical VAWT.

研究分野：流体力学

キーワード：洋上風力発電 CFD 垂直軸型風車 再生可能エネルギー 動揺特性

1. 研究開始当初の背景

大型風車の主流は現在、プロペラと同様の形状である水平軸型風車 (Horizontal Axis Wind Turbine; HAWT) である。タワー頂上にナセルとローターを搭載する大型 HAWT のコンセプトは合理的であり、陸上技術の延長上にある浅海域の着床式洋上風車においても有効である。しかしこのデザインは、堅固な土台の存在を前提としているため、開発水深が深くなり、浮体式風車に移行する場合は注意が必要となる。重心位置の高い HAWT を浮体上で直立に維持するためには、大型浮体が必要となり装置コストを押し上げてしまう。例えば振幅 3 度程度の傾斜動揺でも 100m のハブ高さにおける水平動揺の振幅 5m に達する。風車の設置および保守で浮体上の高所作業が必要となるため、天候による作業日程の不確実性、作業者の安全確保が深刻な問題となる。この問題を解決する手段として、垂直軸型風車 (Vertical Axis Wind Turbine; VAWT) を浮体式風車に適したデザインとして見直す動きがある。VAWT の効率は HAWT に劣るとよく言われるが、これはパワー係数 (出力/受風面積) だけで議論している事が多い。この 2 形式は形態が大きく異なるため、同じ装置コストで受風面積を拡大できれば、経済性評価 (エネルギーコスト) の大小関係は容易に逆転する。

浮体式 VAWT は、ヨー方向制御が不要であるため保守が容易な単純な機構となる。また主要な電気機械類を低い位置に搭載できるため、浮体コストと高所作業を削減できる。欧州委員会が支援するコンソーシアム、INDustrialization setup of a Floating Offshore Wind turbine (INFLOW) では、浮体式 VAWT を開発しており、地中海での実海域試験が予定されている。また国内では、三井海洋開発 (株) が、傾斜を許容した直線翼 Darrieus 風車下端の水中に Savonius タービンを取り付ける、風力・潮流複合型の浮体式発電プラント (SKWID) を提案しており、佐賀県において世界初浮体式潮流・風力ハイブリッド発電が行われる。VAWT の特徴である重心の低さやヨー制御が要らない点は洋上風車としての可能性を示すものと考えてよく、実際の取組みが行われている。

2. 研究の目的

日本国内では現在、他国に先駆けて浮体式洋上風力発電装置積極的に実用化に向けた検証が行われている。風車の形式として HAWT を採用しているこれらの浮体式洋上風力発電装置の大きな問題点は、重心位置の高さに起因する動揺に関するものである。本研究で提案・検証する新しい形式の風車 (両端支持垂直軸型風車) を用いた浮体式洋上風力発電装置については、動揺問題を改善する技術的なメリットが下記に示すとおり 3 点あると考える。

(1) VAWT を用いることで現在主流の HAWT 型洋上風力発電装置よりも重心を下げ

ることが可能となり、浮体全体の傾斜・動揺の減少が期待できる。

(2) VAWT を横に倒し両端支持方式を採用することで、ブレードの支持剛性と回転軸の剛性が向上し、動揺・振動が減少する。

(3) 構造全体の剛性が増すことで耐荷重性能が向上し、風や波が原因となる動揺に対しての相対的な影響力が低下し、浮体を必要以上に大きくする必要がない。さらに、動揺問題だけでなく下記の点においてもメリットが考えられる。

- ・双胴船型の浮体を採用し一点で係留することによって、風車を常に風上に向かせることができる。

- ・浮体が双胴船型となることで、向い波への問題点は小さく、横波に対しても復元モーメントが大きく安全性が確保できる。

- ・ブレード支持点数の増加 (HAWT の場合は片持ち) により、ブレードの軽量化が図れる。

- ・VAWT の方式を Helix-Darrieus 形にすることで、VAWT の問題点であるトルク変動を最小限に抑えることが可能となる。

- ・浮体を船舶の形状とすることで、これまで蓄積されている造船等の技術が利用可能であり、且つ、必要であれば自走も可能となる。これにより、大規模なメンテナンスは造船所などで可能となる。

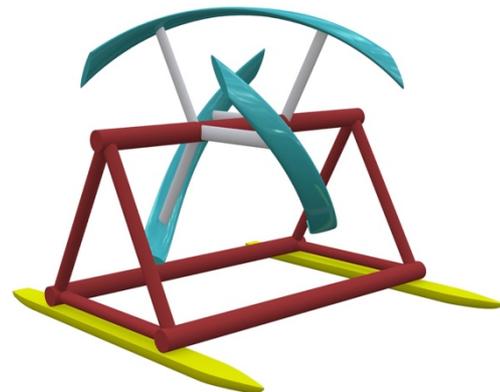


図1 両端支持浮体風車のイメージ

これまで実施されてきた洋上風車の実証実験等は、陸上風車の信頼性が高い技術をベースに取り組みされている。陸上風車は大変古い歴史を持つ技術であるが、発電装置としての利用が始まった黎明期では、様々な種類の風車が試された後に技術的な統合が行われ、一部の小型風車を除いて現在の 3 枚ブレードの HAWT に帰結した経緯がある。VAWT についても、その一形式である Darrieus 風車の大型化がアメリカのサンディア国立研究所や国立再生可能エネルギー研究所を中心に北米地域で試みられたが、大きな成果は得られず、現在までに見直す動きは見られない。

このような状況ではあるが、洋上風力発電用風車を考えた場合、またその大型化について考えた場合、VAWT のメリットは大きく取

り組む価値のある古くも新しい技術である。さらに、本研究で取り組む両端支持方式のVAWTについては潮流発電用としては数例の実用例があるが、洋上風車としては取り組みがなされたことはない。本研究により期待した成果が得られれば、日本発の新しい技術となり、浮体式洋上風力発電において世界のトップランナーとなる。

3. 研究の方法

内容で大別すると①VAWTの性能、形状影響などに関する数値解析 ②回流水槽におけるVAWTの性能計測実験(数値解析結果の検証など) ③浮体式風力発電装置の波浪中動揺及び外力に関する数値解析 ④風洞水槽における垂直軸型洋上風車の一点係留の効果と静水中・波浪中動揺特性計測実験の4段階からなる。いずれも数値解析を用いた調査と、水槽における実験による調査の二つの方法を用いて、得られた成果に対する信頼性を高める工夫をしている。

基本的に、流体力の数値解析についてはANSYS社のFluentを波浪中の動揺解析については同社のAqwaを用いた。また、回流水槽実験と風洞実験水槽実験を実施するために模型を製作した。回流水槽実験においては、垂直軸型風車性能を計測することと数値解析精度の検証を目的として、CFRPで作製した直線翼Darrieus水車を用いた。実験では、流速を一定にした状態で回転数を変化させることで周速比(風車の周速度/流入流速)を変え、周速比に対するトルクと出力の影響を計測した。風洞水槽実験においては、厚紙を防水加工した浮体とFRP製の風車を用いて一点係留に対する追従性と、風と風波に対する動揺特性について、動揺加速度等を計測した。

4. 研究成果

4.1 垂直軸型風車の性能解析

ANSYS社のFluent17.1を用いて垂直軸型風車の性能解析を実施した。本研究においては、浮体の動揺を抑える効果について検証するために、直線翼のDarrieus風車、Helical風車2種類(風車翼を回転軸から30degと60deg傾けたもの、図1のイメージ図のタイプの風車)を対象とした。風車の大きさとしては、回流水槽における実験を考慮して、風車の回転半径を100mm、風車の高さも同じく100mm、風車の翼枚数は3枚とした。風車翼回転位置におけるトルクの発生量について求めた結果を図2に示す。

図2に示すグラフの青線が直線翼、緑線が傾き30degのHelical風車、赤線が傾き60degのHelical風車のトルク係数(トルクを無次元化した値)を表している。横軸は静止した風車の回転位置である。このグラフから、直線翼とHelical(30deg)はいずれもトルク変動が大きいことがわかる。これとは違い、Helical(60deg)についてはトルク変動が小さくなる。最大値としては直線翼のトルク係数

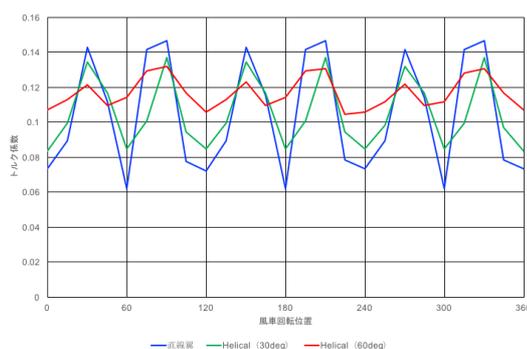


図2 風車発生トルクの数値解析結果

の値が大きいが、本研究の目的となる変動については、Helical(60deg)風車にすることによる効果が大きいと考えられる。グラフは静的な結果であるが、動的な結果でも同様の傾向が見られた。

4.2 浮体式風車の風上追従性能

模型を製作し、風上追従性能試験を実施する。この試験の目的は、水平軸型風車に対してはヨー制御機構できるメリットを、垂直軸型風車に対しては横倒しすることで失う流入風に対する無指向性を、それぞれ満たすことにある。この性能については、双胴式の浮体が船体形状をすることによって担保されるものであり、さらに船首付近の1点を係留することにポイントがある。

浮体式風車の風上追従性能試験、および次節で示す同様加速度計測試験は、鳥羽商船高等専門学校所有の風洞水槽を用いて実施した。また供試模型として製作した浮体式垂直軸型洋上風車(浮体寸法:1100mm×480mm×130mm)の垂直軸型風車部はSavonius型(風車直径210mm、幅200mm)を採用し、低速時のトルクを増大させ風車が起動しやすくした。また風車はフリーローテーションとし発電は行わなかった。風速は5.5m/sで一定、本実験では造波は実施しなかった。

以上の条件で、浮体を流入流に対して向かい風状態を0degとして45deg、90deg、135degに傾けた状態で始動させ、風上追従を行うかどうかをビデオ撮影(Sony DCR-SR100)することで評価した。流入流に対する傾きを図3に示す。

それぞれの傾斜角度から手で保持し、手を離すとすぐにほぼ一定の割合(10deg程度)で風上を追従し、8.0 sec間で完了する様子が見て取れる。なお、風上に正対した状態になった後、風車の回転を止めている場合のみ多少振れ回る傾向が見られた。風車が回転している状態ではこの現象は見受けられなかったため、これは風圧抵抗が作用する高さに起因するものと考えられる。また風上の追従に時間の差はあるが、初期傾斜角度にかかわらず風上を向く傾向が見られた。したがって、本研究にて提案するこの浮体システムは、風上追従性があると言える。

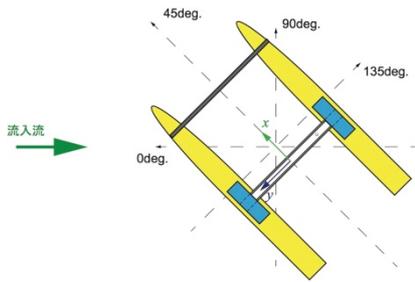


図3 浮体式風車の風上追従性能

4. 3 浮体式風車の動揺加速度計測

実験の目的は、双胴型浮体の特徴である安定性を確認することにある。6自由度全ての加速度を計測することで、この性能について見極めができると考えられる。この性能が高いということになれば、本研究で提案している横倒しの垂直軸型風車だけでなく、一般的な垂直軸型風車や水平軸型風車も設置する事ができる浮体として有用性が高まる。基本的な実験の条件は前節における風上追従性能試験と同様であるが、動揺加速度については風速を3.5m/sと5.5m/sの二種類とした。

また、加速度計測にはMicrostone社のMVP-RF8-HC-500を使用し、風速3.5m/s、5.5m/sの中、風車が流入風に正対した(0deg)状態で計測を実施した。加速度の計測方向は6自由度全ての方向の加速度(surge方向: A_y , sway方向: A_x , heave方向: A_z , roll方向: G_y , pitch方向: G_x , yaw方向: G_z)について計測を実施した。また計測時間は20sec(500Hz)とし、Bluetoothで水槽外のPCへ送信しロギングした。

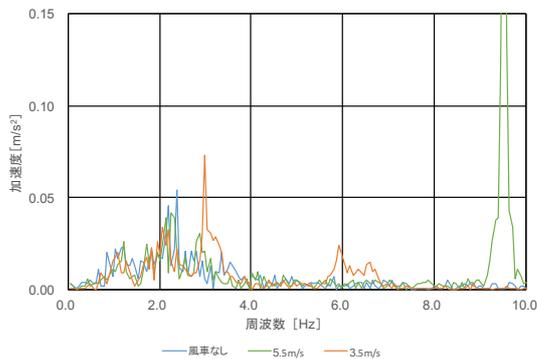


図4 浮体式風車の動揺加速度計測 (Az: heave 方向)

図4に速度の違いと風車設置の有無が上下方向加速度 A_z に及ぼす影響について計測した結果を示す。なお図中には、加速度をFFT(Fast Fourier Transform)解析した結果が示されている。回転している風車が浮体動揺におよぼす影響を風速変化に着目すると、3.5m/sにおいて卓越動揺周波数は2.991Hzであり加速度のピークは0.073m/s²となっている。5.5m/sでは9.520Hzの周波数で0.323 m/s²と

なる。なお、風車を設置していない場合の浮体動揺にあたる風速変化の影響は、卓越周波数が2.075 Hzから2.380 Hzへ僅かに増加するだけである(加速度は0.043m/s²から0.054m/s²へ微増となる)。したがって卓越周波数、動揺加速度が風速変化に大きく依存するのは風車の回転が存在するためであるといえる。また本実験では、安定した回転力を与えることができる抗力型の風車であるSavonius型を用いたが、揚力型風車であり、トルク変動が少ないHelical風車などを用いることで、動揺が抑えられる可能性がある。

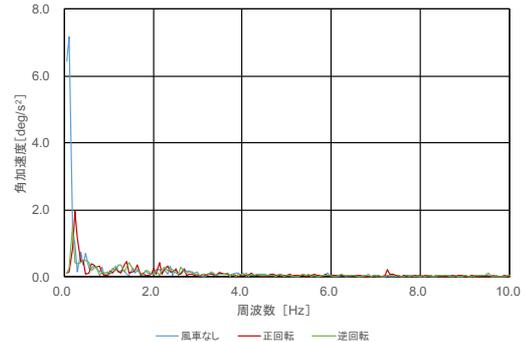


図5 浮体式風車の動揺角加速度計測 (Gz: yaw 方向)

次に、図5にyaw方向の角加速度 G_z の計測結果を示す。風車が設置されていない結果において極低周波数で卓越した角加速度が計測されている。この角加速度は単純に触れ回りが表現されたものであり、目視で確認できた。反対に言えることは、風車が回転していることで浮体の触れ回りの減少を抑制できるということが判明した。

4. 4 研究成果のまとめ

新しい形式である両端支持垂直軸型洋上風車を提案し、風車を対象とした数値解析の実施、風上追従性と動揺角加速度を計測するための風洞水槽実験を行った。本研究を通して垂直軸型風車のトルク変動、浮体式風車の動揺特性と動揺への風速影響を計測した結果、下記のことが判明した。

- ・揚力型垂直軸型の発生トルクは、回転軸から60deg傾けたHelix-Darrieus形にすることで、直線翼風車に対して絶対値は低下するが、変動の大きさは減少する
- ・双胴型の浮体を一点係留とすることで、風上追従性が確認され、その効果は流入風の角度によらない
- ・浮体式風車の動揺加速度を計測することで、風速の増加が浮体上下方向へ与える動揺への影響が分かった
- ・浮体式風車の動揺角加速度を計測することで、浮体へ風車を設置することで浮体が触回りが抑制されることが分かった

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

①渡辺 幸夫、大浦 伸介

シュラウドを有する浮遊式海流発電用水車に関する研究、日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集、査読無、第94期、2016、0S6-1-0603

②渡辺 幸夫、嶋岡 芳弘

レイノルズ数影響を考慮した水平軸型海流発電用水車の性能解析、鳥羽商船高等専門学校紀要、査読無、38巻、2016、1-6

〔学会発表〕(計 1件)

①渡辺幸夫、シュラウドを有する浮遊式海流発電用水車に関する研究、第94期日本機械学会流体工学部門講演会、2016年11月12日～13日、山口大学工学部

〔その他〕

ホームページ等

<https://researchmap.jp/read0194841/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 幸夫 (WATANABE, Yukio)

鳥羽商船高等専門学校・商船学科・准教授

研究者番号：20332033