

令和元年6月19日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06911

研究課題名(和文) 無動力で風追従する新しい係留方式を用いた浮体式洋上風力発電に係る研究

研究課題名(英文) Research and Development of Single Point Mooring System Floating Wind Turbines

研究代表者

二瓶 泰範 (Nihei, Yasunori)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00470055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：持続可能な自然エネルギー資源の開発は地球温暖化対策のみならず急速に増え続けてきた石油・石炭・天然ガス等の化石資源依存を少しでも減らすために重要なテーマである。特に、本研究では、新形式の一点多本係留方式を用いた浮体式洋上風力発電の基礎的研究開発を行った。この浮体式風車実現に向けて、振り回り運動、浮体への波の荷重推定が重要な課題であり、実験および数値計算の上から特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一点多本係留方式を用いた浮体式風力発電は、極めて新規性のある研究である。この浮体式風車の実用化は浮体式風車で問題となるコスト削減等につながる。しかし、係留方法が極めて新しいため、風や流れの中での挙動は分からないことが多かった。本研究では、風や流れの中での挙動を実験・数値計算の上から明らかにした。今後、このような浮体式風車が実現される時、本研究の手法や結果が基礎的知見として利用される。

研究成果の概要(英文)：Recently, FOWTs are attracting a great deal of attention as offshore renewable energy source in terms of its energy efficiency and potential. As one of the solutions, Single Point Mooring system is proposed. In this study, the weathervane and stability performance of Floating Offshore Wind Turbines (FOWTs) moored to Single-Point-Mooring (SPM) system in the wind and current coexisting field is considered. The scaled models are experimented in a circulating water tank at Osaka Prefecture University, Osaka, Japan. It was found out that the weathervane performance of both the FOWTs types was acceptable in rated wind and slow speed current condition. In addition, a numerical simulation program was developed assuming the SPM-FOWTs modelled as two rigid bodies. The result of the program is discussed and compared to the results of the experiments. In this study, we also discussed about wave pressure distribution and wave loads on the floating platform.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海洋資源 エネルギー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

持続可能な自然エネルギー資源の開発は地球温暖化対策のみならず急速に増え続けてきた石油・石炭・天然ガス等の化石資源依存を少しでも減らすために重要なテーマであることは言うまでもない。特に洋上風力、中でも浮体技術を応用した浮体式洋上風力は世界第6位の広大な排他的経済水域を有効利用し我が国のエネルギー自給率を高める可能性を秘めており世界中で研究開発が進んでいる。

我々は、新形式の一点多本係留方式を用いた浮体式洋上風力発電の水槽試験・数値計算・実海域試験を通じた研究開発をこれまで行ってきた。風車は風向に合わせて都度モータを駆動し風車の向きを調整する。本来発電することが目的だが余分な電気を使ってしまう。この問題点を踏まえ我々は完全無動力で風追従することの可能な浮体式風車の研究開発に取り組んでいる。それが一点多本係留方式を用いた浮体式風車である。

この一点係留式浮体式風車の技術は、大型の浮体式風力発電機への応用が可能である。また、設計されるサイズが小型であっても、養殖漁業における独立電源としても応用することが可能である。例えば、自動給餌装置の導入による漁業従事者の労働軽減、マイクロバブル利用等による水産商品の高付加価値化、曝気装置による海洋環境の修復等における独立電源への応用である。

以上の背景からこの新しい浮体式洋上風力の基礎的研究開発を行うこととした。

2. 研究の目的

浮体式洋上風車のように水深の限られる場所ではこれまでの石油掘削リグのような従来の浮体形状とは異なり、大きな浮力体を有する特殊形状の浮体となる場合が多い。特殊形状浮体の波力推定法に言及している例は申請者の知る限り非常に少ない。しかし近年浮体式洋上風力の利用は拡大されようとしており特殊形状浮体の波力推定手法および流体力学的なメカニズムについては明らかにすべきである。よって、このような浮力体を備える特殊形状浮体の流体力学的メカニズムについて明らかにすることが本研究の目的である。

また、一点係留方式の浮体式風車は、風追従する間に発電は出来ず、従来のモータ駆動型に比して一点多本係留型の浮体式風車の発電量が増えるかについては定量的に明らかにすべき課題である。無動力で風追従する機構を備えた浮体式風車は我々によって初めて行われている取り組みであり、国内外問わずこれまでの研究例は皆無である。発電量を考慮する上で重要な、一点係留方式の浮体式風車の回頭の性能について明らかにすることも本研究の目的の一つである。

3. 研究の方法

(1) 浮力体を有する特殊形状浮体の波力評価

浮力体と細い筒形状からなる直立円柱(アドバンストスパー型)を組み合わせた浮体形状を取り上げ、模型実験によって固定時の浮体に働く全波力と浮体周壁面の各点の波圧を計測し、実験的に最大波力の発生機構を明らかにする。また、実験値とモリソン式による全波力の評価誤差を行い、浮力体に働く波力の算定と最大波力の発生機構を調査する。そして、アドバンストスパー型の波力の評価方法の提案を行う。

(2) 一点係留方式を採用した浮体式風力発電の回頭性能

浮体式洋上風車の代表的な浮体である SPAR 型浮体と Semi-Sub 型浮体について、5MW モデル風車を搭載できる 1/200 スケール模型を用いて、風・流れ共存場での振れ回り運動を実験的に調査する。さらに、実験条件と同条件において浮体式洋上風車の振れ回りに関する時刻歴プログラムを開発する。そして、実験結果を元に、シミュレーション結果について検討を行うこととする。

4. 研究成果

(1) 浮力体を有する特殊形状浮体の波力推定

(1).1 実験概要

実験は、長さ 70[m]、幅 3[m]、深さ 1.6[m]の造波機を備えた水槽を用いて行なった。浮体模型を完全に固定し、規則波を入射したときの水平方向の全波力と浮体表面の変動圧力を計測する。実験装置は、浮体模型を鉛直方向の片持ち梁構造として固定し、三成分検力計を上部に設置し、直径 3[cm]の小型圧力計を浮体に埋め込み、円柱に作用する水平方向の全波力と、圧力計位置での動圧を計測するものである。Fig. (1).1 のように x、z 座標を定義し、実験装置と圧力計の設置位置の概略を示す。細いコラム側面の入射波に対する前面と後面に圧力計を取り付け、太いコラム側面では $\theta = 45[^\circ]$ ごとに円周上に圧力計を取り付けた。Fig. (1).1 の右図に実際に本研究で用いた浮体模型と寸法を示し、Table (1).1 に規則波の条件を示す。

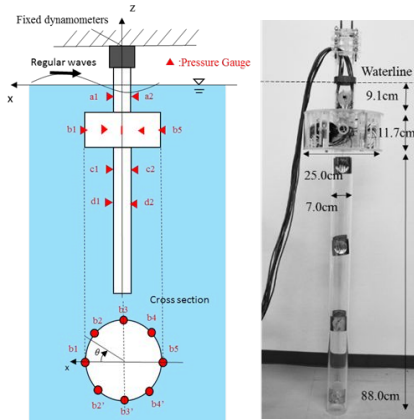


Fig.(1).1 setup of the experiment and the test model .

Table (1). 1 Wave condition.

Item	Value	Unit
Wave period	0.6,0.7,0.8,~, 1.5	sec
Wave height	2.0~3.0	cm
Water depth	154	cm

(1).2 波力のハイブリッド評価手法の提案

ここで、太い円柱に働く波力とモリソン式 ($C_M=2.0$) により算定した細い円柱における波力の和をとり、検力計による全波力と比較を行なった。Fig.(1).2 より、波力の値はほぼ一致しており、定量的に評価が行なえているといえる。この結果から、大小異なる径の円柱部材を組み合わせたアドバンススパー型浮体のような構造物に作用する波力の評価は、浮体直径の入射波の波長に

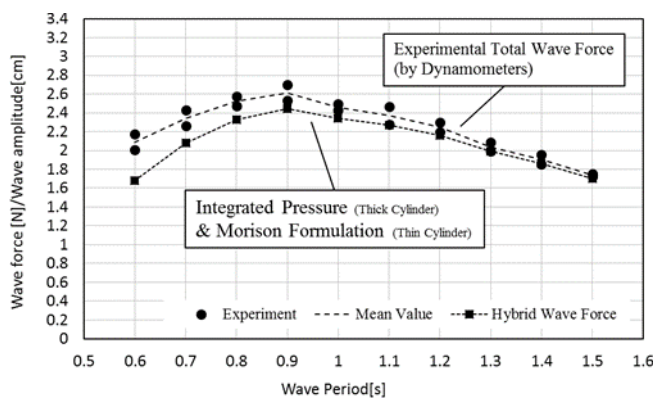


Fig.(1).2 Total wave force of hybrid calculation

対する比が $D/\lambda < 0.2$ となる細い円柱ではモリソン式もしくはポテンシャル理論、 $D/\lambda > 0.2$ となる太い円柱ではポテンシャル理論により波力の評価を行ない、足し合わせる方法が適していると言える。

(2)一点係留方式を採用した浮体式風力発電の回頭性能

(2).1 実験概要

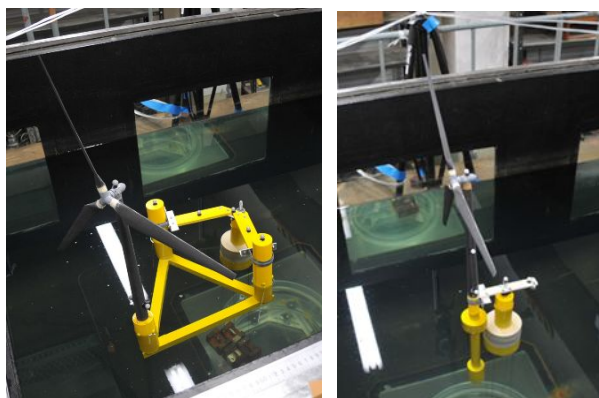
Table (2).1 Principal particulars of the tower and nacelle, rotor.

Item	Value	Unit
Hub diameter	630	mm
Hub height	450	mm
Rotor + Nacelle mass	53.5	g
Tower mass	35.2	g
Airofoil	NACA4412	

本研究の実験に用いる風車模型の主要目を Table(2). 1 に示す。風車模型は NREL の 5MW の風車をモデルにしてフルード則により 1/200 にスケールダウンしている。また、風車は三枚翼でありダウンウィンド型である。

本実験に用いる Semi-Sub 型及び SPAR 型浮体は、係留ブイを用いている。係留ブイは浮力による強制緊張力を用いて係留している。ブイ上部には回転機構を取り付けており、回転機構と風車は頸木を介してつながっている。そのため、風車浮体はブイを中心として回転することが可能となっている。ブイを取り付けた Semi-Sub

型及び SPAR 型浮体の様子をそれぞれ Fig.(2).1 の(a)、(b)に示す。



(a) Semi-Submersible type. (b) SPAR type.
Fig.(2).1 1/200 scale model of FOWTs.

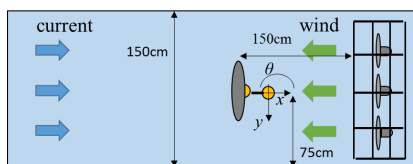


Fig.(2).2 coordinate system of the experiments (SPAR).

Table (2).2 Test conditions.

Item	Conditions	Unit
Type of floating body	SPAR, Semi-Sub	-
Wind Speed	0, 2.2(Rated Thrust)	m/s
Current Speed	0, 3.69, 7.23, 11.0	cm/s
Initial angle	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315	degree

SPAR 型及び Semi-Sub 型浮体の 1/200 模型を用いて、大阪府立大学の回流水槽にて実験を行った。実験の配置と座標を Fig.(2). 2 に示す。また実験流速、風速及び初期角度は Table (2). 2 に示す条件を組み合わせで行った。

(2).2 回頭シミュレーション

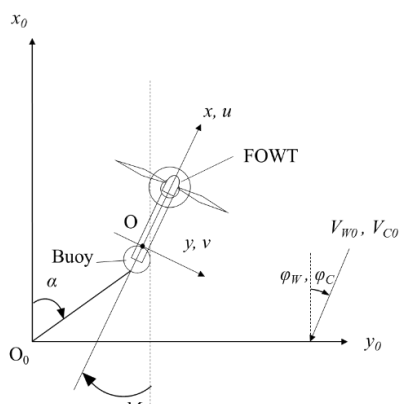
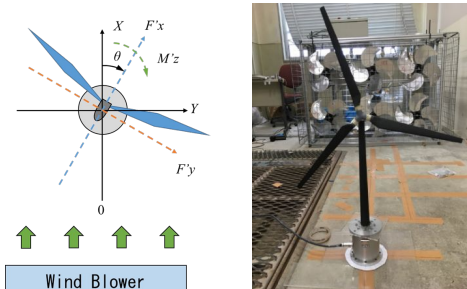


Fig.(2).3 The coordinate system of FOWTs.

本研究のシミュレーションでは一般に船の操縦運動を解く方程式として用いられるオイラーの運動方程式を使用する。この運動方程式は空間固定座標系 (0₀-x₀y₀) ではなく、浮体式風車の回転中心を原点として固定された座標系 (0-xy) を用いる。Fig.(2).3 に座標系を示す。

u, v [m/s]はそれぞれ x, y 軸方向の速度、 r [rad/s]は角速度であり、 X, Y [N]及び M_z [Nm]はそれぞれ浮体式風車にかかる x 方向の力、 y 方向の力及び z 軸回りのモーメントである。また V_{w0} と V_{c0} [m/s]はそれぞれ風速及び流れの速さであり、 ϕ_w と ϕ_c [deg]はそれぞれ風と流れの方向である。オイラーの運動方程式を数値シミュレーションによって解く。

風車にかかる風荷重は風が流入する角度により異なる。その風荷重を推定するため、本研究では実験で用いた風車模型にかかる風荷重を計測した。風車の角度を 15° ずつ変化させながら Fig.(2).4(a)に示す力 F'_x, F'_y [N]及びモーメント M'_z [Nm]の計測を行った。尚、風速は実験風速と同じである 2.2 [m/s]で行



(a) Measurement items. (b) Image of Measurement.

Fig.(2).4 Measurement of wind load.

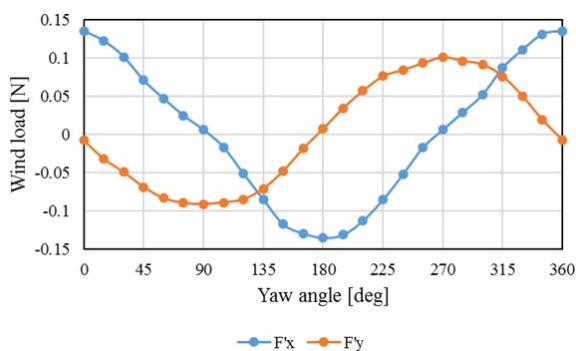


Fig.(2).5 The result of wind load

った。計測した風荷重を Fig. (2).5 に示す。

(2).3 実験・シミュレーション結果

結果の一例として、風と流れがある場合の結果を示す。風速 2.2[m/s] で流速 0.0369、0.0723[m/s] での結果はシミュレーションの方が早く風追従するという結果になった。ここで、風速 2.2[m/s]、流速 0.11[m/s] での Semi-Sub 型浮体の実験結果を Fig. (2).6 に、シミュレーション結果を Fig. (2).7 に示す。

Fig. (2).6、Fig. (2).7 より、シミュレーションではすべての初期角度において風追従しているため、SPAR 型においても流れによる荷重を過小評価していると思われる。また、実験では非常に不安定な触れ回りが確認できた。

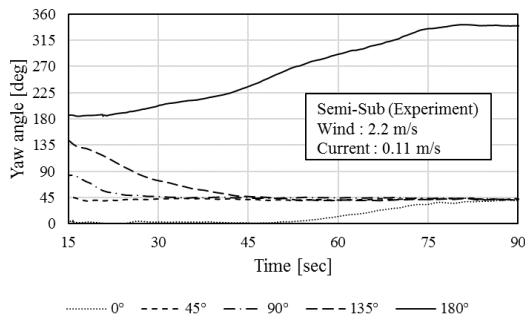


Fig.(2).6 Experimental result of Semi-Sub ($V_{w0}=2.2$, $V_{c0}=0.11$).

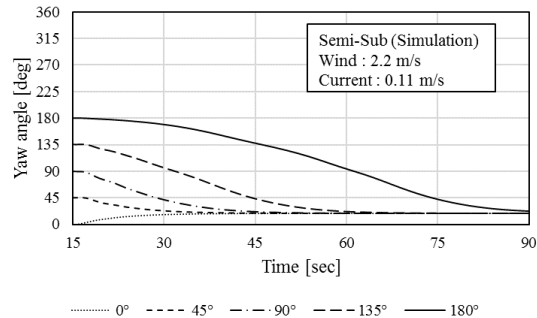


Fig.(2).7 Simulation result of Semi-Sub ($V_{w0}=2.2$, $V_{c0}=0.11$).

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

1. Qiao Li, Yasunori Nihei, Wave drift forces' calculation on two floating bodies based on the boundary element method-Attempt for improvement of the constant panel method-, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.141, No.4, 査読有, 2019 DOI: 10.1115/1.4042180
2. Takayuki Hirai, Akira Sou, Yasunori Nihei, WAVE LOAD ACTING ON ADVANCED SPAR IN REGULAR WAVES, Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, 2018
3. Kazuma Kusanagi, Sharath Srinivasamurthy, Yasunori Nihei, SLEWING EFFECT OF TWIN VERTICAL AXIS TURBINES SUPPORTED BY A FLOATING PLATFORM ABLE TO ROTATE AROUND A SINGLE MOORING SYSTEM, Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, 2018
4. 橋本和樹, Sharath Srinivasamurthy, 二瓶泰範, 一点係留された浮体式洋上風車の風・流れ共存場における振れ回り運動に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 27 号, 2018, pp533-538
5. Y.Nihei, Y.Matsuda, S.Kitamura, K.Takaiwa, N.Kanda, Research and Development about the Mechanisms of a Single Point Mooring System for Offshore Wind Turbines, Ocean Engineering Vol.147, 査読有, 2018, pp431-446 <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.043>
6. S.Yamanaka, T.Hirai, Y.Nihei, A.Sou, Interaction between Advanced Spar and Regular Waves, Proceedings of the 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, 2017
7. S.Kimura, Y.Nihei, Experimental Investigation of Wave Forces on Advanced Spar-type Floating Body Composed of Small and Large Cylinders, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 25 号, 2017, pp 47-52
8. 平井崇起, 山中伸悟, 宋明良, 二瓶泰範, コラムを有する円柱状海洋構造物の波荷重, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 25 号, 2017, pp515-518
9. Qiao Li, Takashi Tsubogo, Yoshiho Ikeda, Yasunori Nihei, A Study on the Wave Drift Forces Calculation on two Floating Bodies based on the Boundary Element Method, Proceedings of the 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, 2016
10. Sharath Srinivasamurthy, Kazuhiro Iijima, Yasunori Nihei, Naoyuki Hara, Coupled Simulation between Fast and Hydro-structural Code for a Flexible FOWT considering Blade Pitch Control Malfunction, Proceedings of the 35th International Conference on

Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, 2016

11. Yuki Mizukami, Yasunori Nihei, Kazuhiro Iijima, Naoyuki Hara, A Study on Motion Characteristics of Wind Turbine on a Floating Platform in Blade Pitch Control Malfunction, Proceedings of the 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有, 2016
12. 山中伸悟, 平井崇起, 木村暁, 二瓶泰範, 宋明良, コラムを有する円柱状海洋構造物と波の相互作用, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読無, 23号, 2016, pp.583-586
13. N. Hara, S. Tsujimoto, Y. Nihei, K. Iijima, K. Konishi, Experimental validation of model-based blade pitch controller design for floating wind turbines: system identification approach, Wind Energy, 査読有, Vol.20, 2016, pp.1-20
DOI: 10.1002/we.2089

〔学会発表〕(計 9件)

1. Takayuki Hirai, Akira Sou, Yasunori Nihei, WAVE LOAD ACTING ON ADVANCED SPAR IN REGULAR WAVES, OMAE2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 17th – 22th June 2018, Madrid (Spain)
2. Kazuma Kusanagi, Sharath Srinivasamurthy, Yasunori Nihei, SLEWING EFFECT OF TWIN VERTICAL AXIS TURBINES SUPPORTED BY A FLOATING PLATFORM ABLE TO ROTATE AROUND A SINGLE MOORING SYSTEM, OMAE2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 17th – 22th June 2018, Madrid (Spain)
3. 橋本和樹, Sharath Srinivasamurthy, 二瓶泰範, 一点係留された浮体式洋上風車の風・流れ共存場における振れ回り運動に関する研究, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2018年11月26日~27日, 柏市(千葉)
4. S.Yamanaka, T.Hirai, Y.Nihei, A.Sou, Interaction between Advanced Spar and Regular Waves, OMAE2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 25th – 30th June 2017, Trondheim (Norway)
5. 二瓶泰範, 洋上風力発電のための新しい浮体式構造物の提案, 次世代風力発電システムの創成寄附講座 第5回シンポジウム, 2017年9月4日, 東京
6. S.Kimura, Y.Nihei, S.Srinivasamurthy, Dynamic Pressure Distribution and Wave Forces on Offshore Spar-type Wind Turbines in Diffracted Wave Field, The 10th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (IWSH), 5th – 8th Nov. 2017, Keelung (Taiwan)
7. 平井崇起, 山中伸悟, 宋明良, 二瓶泰範, コラムを有する円柱状海洋構造物の波荷重, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2017年11月27日~28日, 広島市(広島県)
8. Sharath Srinivasamurthy, Kazuhiro Iijima, Yasunori Nihei, Naoyuki Hara, Coupled Simulation between Fast and Hydro-structural Code for a Flexible FOWT considering Blade Pitch Control Malfunction, OMAE2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 19th – 24th June 2016, Busan (South Korea)
9. Yuki Mizukami, Yasunori Nihei, Kazuhiro Iijima, Naoyuki Hara, A Study on Motion Characteristics of Wind Turbine on a Floating Platform in Blade Pitch Control Malfunction, OMAE2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 19th – 24th June 2016, Busan (South Korea)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。