

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820424

研究課題名(和文) 浮体式洋上風力発電ファームと波力発電とのハイブリッド利用に関する新提案とその研究

研究課題名(英文) Discussion on Hybrid Utilization for Offshore Wind and Wave Energy

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： 波浪外力が浮体式洋上風力発電に及ぼす影響は、浮体動揺下でのメンテナンス、構造部材等への影響といった側面から鑑みて大きな問題である。本研究において風力発電ファームと、波力発電施設のハイブリッドエネルギー利用に関する新たな提案を行った。提案は、風力発電施設を波力発電用浮体によって囲むことにより、風力発電用浮体への波浪影響を吸収し、波力エネルギーと安定した風力エネルギーを作り出すというものである。実施期間で風力・波力ハイブリッドエネルギー利用に関する研究を実施した。波力発電浮体に見立てた浮体群を浮体式風車周りに浮かばせた模型試験や波浪場の数値計算により、その効果を検証した。

研究成果の概要(英文)： In this work, we will discuss the concept of combined utilization of offshore wind and wave energy in terms of both tank test and numerical simulation. There are some possibility that combined utilization of ocean renewable energies can avoid some disadvantages that single utilization of them may have, such as cost problem associated with the stability of power and power supply. In this work, we focus on the motion of an offshore wind turbine in waves associated to wave energy converters, are installed in the same area in order to improve its motion by reducing the effect of incident waves. We carried out wave tank test and numerical simulation, and investigated the motion of wind turbine in waves. In addition, numerical simulation allows to visualize the wave fields around those devices. Appropriate arrangement of them is discussed for the most efficient utilization of offshore wind and wave energy.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：浮体式洋上風力 波力発電 ハイブリッド利用

1. 研究開始当初の背景

現在我々は化石燃料をはじめとする莫大なエネルギー消費により、大量の温室効果ガスの排出や化石燃料の枯渇などの深刻な環境問題やエネルギー問題に直面している。また2011年3月に発生した東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故を受けて、エネルギーの安全保障の観点からも我が国のエネルギーのあり方について見直しが進められている。このような状況から、化石燃料や原子力に依存したエネルギー供給から脱却し、再生可能エネルギーの導入を拡大することが求められている。特に、世界第6位という広大な排他的経済水域(EEZ)を保有する我が国では海洋エネルギーを有効利用することが重要であると言える。中でも洋上風力や波力、潮流・海流などの海洋エネルギーは我が国では膨大な賦存量が存在することが確認されており、現在導入拡大に向けて開発が進められている。しかし、単一のエネルギー利用では発電量の変動が起きやすいことや設置や送電を含めた発電コストが大きくなることが問題として挙げられる。特に洋上風力発電では、波浪中で風車を設置している浮体が動揺することで発電量低下や疲労破壊を招く可能性がある。これらの問題を解決するために、海洋エネルギーのそれぞれの特徴を生かし、欠点を補完し合うように、それらを複合利用することが望まれる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、洋上風力に並ぶ有望な海洋エネルギーとして実用化が期待されている波力発電の特性に着目し、洋上風力との複合発電を目的とした大規模集中発電設備(ファーム)を形成する構想について検討を行う。特に波力発電を洋上風力発電と同じ海域に設置することによる洋上風車の運動や流場に及ぼす影響に主眼を置き、水槽試験により実験的に検証を行う。そしてその結果をふまえて、洋上浮力発電と波力発電による複合発電ファーム設置構想の検討を行う。

3. 研究の方法 - 複合発電ファームの概要 -

浮体式洋上風力発電と浮体式波力発電を同一の海域に設置することを想定した場合、期待できる利点を示す。

- ・洋上風力発電の波浪中での動揺の軽減
 - ・設置密度を高めることによる海面利用効率の向上
 - ・送電施設の共用による発電コストの低減
- 波力発電には消波特性があることから波浪中での洋上風車の動揺を抑えることで風車の発電効率を上げることが期待できる。また、集中的な設置が可能となることから、海面利用効率を向上させ、洋上風車の欠点を補完できると考えられる。さらに、洋上風車の送電施設である海底送電ケーブルをシェアすることによ

り発電コストの低減が実現できる可能性がある。

本研究では日本近海に設置する複合発電ファームの開発を目的としている。Fig.1に複合発電ファームのイメージ図を示す。

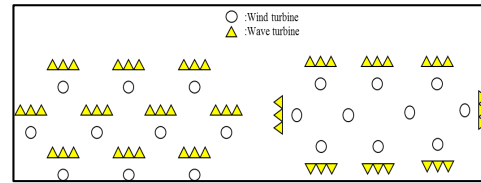


Fig.1 Image of the combined power farm

風車だけのファーム形成では遮蔽影響による発電量低下を防ぐために風車どうしの間隔を広く取る必要がある。波力発電装置は海面上の露出部が低く、上空の風を乱す影響が小さいため洋上風力発電の間を埋めるように設置することが可能であると考えられる。

本研究では波力発電装置を洋上風力発電の周辺に設置することによる、風車の運動や流場に及ぼす影響を把握するため、基礎的な調査を行うこととした。

4. 研究成果

4.1 水槽試験による検証

浮体式洋上風力発電と同じ海域に波力発電を設置することによる波浪中での風車の運動や流場に及ぼす影響を調査することを目的として、東京大学生産技術研究所海洋工学水槽にて水槽試験を実施した。

4.1.1 供試模型

波力発電装置は我が国でも開発が進んでいる沖合浮体式振動水柱型を想定しており、簡易モデルとしてアルミニウム製箱型浮体を用いて検証を行った。その主要目をTable1に示す。振動水柱型では高効率で波エネルギーを吸収するために波との同調を狙って設計されることから、浮体のheaveの固有周期が対象とする波の周期と一致させるように設計した。

Table 1 Principal particulars of wave turbine model

L [cm]	40
B [cm]	40
d [cm]	16
Mass of the float [kg]	25.6
Natural period of heave [sec]	0.8

また、使用した洋上風車模型は5MWスパーク型風車の縮尺1/100模型であり、その主要目をTable2に示す。スパーク型は単純な細長い円筒構造で喫水が深く、水線面積が小さいという特徴を有する。TLP型に比べ上下揺れや縦揺れが大きく、波の影響を受けやすいという欠点がある。

Table 2 Principal particulars of offshore wind turbine model

Mass of the float [kg]	9,408
Draft [cm]	109.3
KG [cm]	51.0
GM [cm]	14.6
Natural period of heave [sec]	4.0
Natural period of pitch [sec]	2.5

4.1.2 配置及び係留方法

本実験では風車の周辺に設置する浮体の配置の仕方は Fig.2 に示す直列配置と千鳥配置の2ケースで実験を行った。

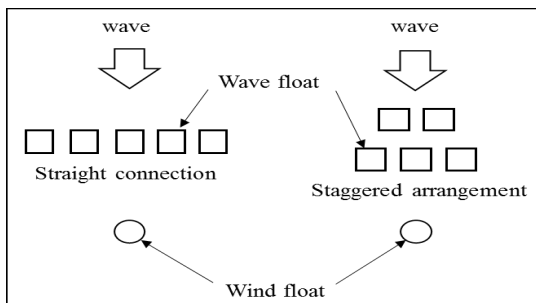


Fig.2 Array of the floats

また、波力発電モデル浮体は浮体どうしをステンスリングで結合し、両端の浮体をワイヤーで係留している。また、風車模型についてはステンスチェーンによるカテナリー係留としている。Fig.3に係留された風車模型と直列配置の浮体の様子の写真を示す。

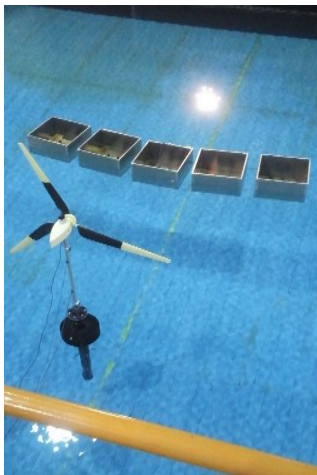


Fig.3 Photo of the arrangement of models

4.1.3 設定海象条件

実験における海象条件については Table3 のように設定した。5MW 風車が定格に達するとき、波周期 7.0[sec] ~ 8.0[sec]、波高が 3.0[m] ~ 4.0[m]程度となること及び日本近海における代表的な海象条件などを包括的に考慮し、実機と模型のスケールダウン比やフルード則から実験における波周期と波高を設定した。

Table 3 Natural environment condition

Wave period [sec]	0.5 ~ 1.0
Wave height [cm]	3.0 or 6.0
Wind velocity [m/s]	2.1
Water depth [m]	1.6

波高は基本的に 3.0[cm]とし、波周期は 0.1[sec]間隔で変化させ、波周期 0.8[sec]のときのみ波高 6.0[cm]のケースも計測を行った。風速は風車が必要な風抗力を得られるブレード回転周波数が 3.0[Hz]となる送風装置設定回転数 155[rpm]で実験を行った。送風装置のキャリブレーション結果から、風速は約 2.1[m/s]であった。水深は全てのケースで 1.6[m]で一定とした。

4.2 実験結果

風車の運動は surging, heaving, pitching について、タワー上部と基部に設置した 2 つの LED センサの変位を CCD カメラで追跡する方法で計測した。また、4 台の容量式波高計を用いて入射波の波高と浮体後方の波高を計測した。浮体後方の波高については風車模型の設置位置における波高を測定している。波力発電浮体を設置しない場合と直列配置及び千鳥配置にする 3 パターンについて実験を行った。解析は各運動の 1 次平均振幅(風車の運動が定常状態になった際の 1 次振幅の平均値)と最大応答変位(絶対値)に着目して行うこととした。2 つの LED センサの位置関係から風車を搭載している浮体の重心周りの運動を算出している。

4.2.1 波浪単独試験

まず送風装置を使わず、造波装置のみを作動させて波浪単独試験を行った。波高 3.0[cm]とした場合の各波周期における風車の heave 及び pitch の 1 次平均振幅を Fig.4 と Fig.5 に示す。

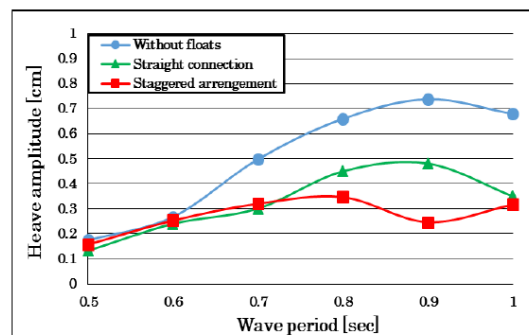


Fig.4 Heave amplitude in waves (wave height 3.0[cm])

Fig.4 より風車単体においても短周期では heave の 1 次振幅は小さい値となっているが、長周期になるにつれ振幅が増大する傾向があるのは heave の固有周期に近づくためであると考えられる。波周期 0.7[sec]以降では浮体の設置により、それぞれの配置の仕方において heave 振幅の減少が確認できた。

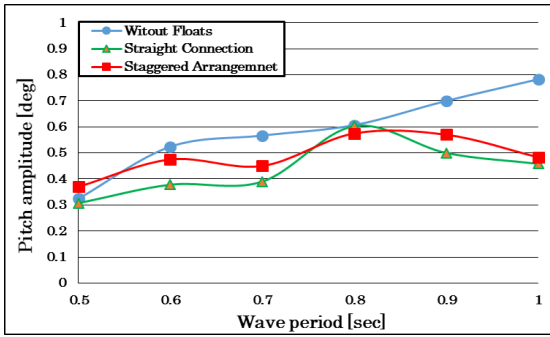


Fig.5 Pitch amplitude in waves
(wave height 3.0[cm])

pitchの1次振幅についても、長周期になるにつれ、振幅が増加する傾向が見られる。heaveと同様に浮体の設置による振幅の減少が見られるが、浮体を設置した際に Fig.4と Fig.5において周期0.8[sec]~0.9[sec]で比較的風車の heave 振幅が増大していることが確認できる。これは波力発電浮体の同調が関係していると考えられる。

Surgeの1次振幅にはほとんど差は見られなかったが、短周期では surge の最大応答変位である最大漂流距離が抑えられていることが確認できた。Fig.6 に波浪単独試験における surge の最大応答変位を示す。

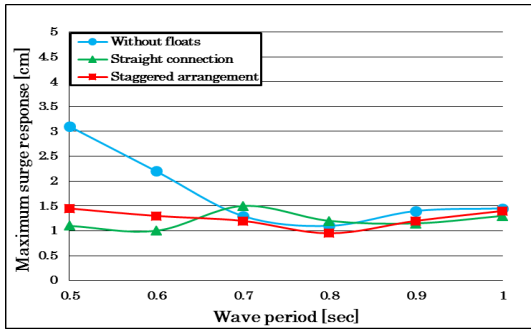


Fig.6 Maximum surge response in waves

Heave 運動では波が風車に來襲してから運動が定常になるまで過渡状態となることが0.5[sec]~1.0[sec]の全ての波周期において観測でき、そのときに大きな過渡応答が現れていることがわかった。浮体の設置により、この過渡応答が大幅に低減できていることが確認できた。Fig.7 に波浪単独試験における heave の最大応答変位を示す。

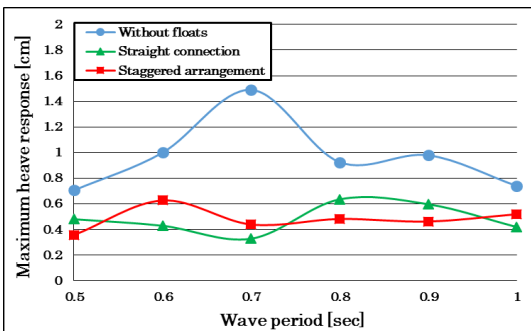


Fig.7 Maximum heave response in waves

Fig.7から短周期から長周期まで、全ての波周期で heave の最大応答変位が抑えられており、浮体を設置したケースではほとんど過渡応答は見られなかった。また、pitch については大きな過渡応答はほとんど確認されず、浮体の有無による最大傾斜角に差は見られなかった。

また、波周期 0.8[sec]のケースのみ設定波高を6.0[cm]として計測を行った。浮体を設置しないケースと直列配置にしたケースの heave 運動の時系列の比較を Fig.8 に示す。

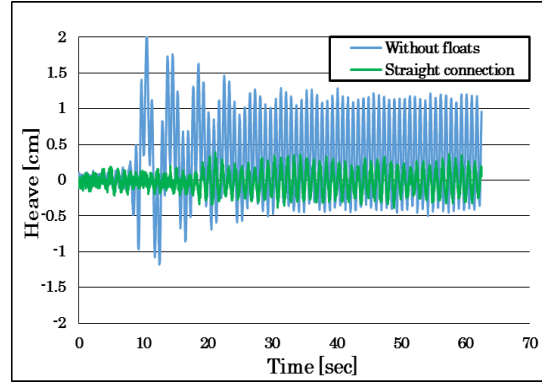


Fig.8 Time series of heave motion in waves

波高 6.0[cm]においては風車単独では過渡応答変位が最大2.0[cm]まで観測されたが、直列配置では過渡運動状態はほとんど現れおらず、1次振幅も60%近く低減されていることが確認できる。surge, pitchについても同様に1次振幅と最大応答変位は低減されていることが確認できたが heave が最も浮体の設置による1次振幅や応答変位の減少が大きいことが確認された。一般的に風車の heave 運動は発電量低下に大きな影響は及ぼさないとされているが、過渡応答や1次振幅を大幅に減少させることは風車に搭載された様々な機器や制御装置などの発電システムに与える負荷を軽減させるため、風車の可動年数の向上につながると考えられる。そのため、風車の波浪中での過渡応答を減少させることは非常に重要であると言える。

4.2.2 風波共存場試験

風波共存場試験では波高3.0[cm]とし、送風装置を風車から2.0m離れたところから風を送った。Fig.9とFig.10に風波中でのpitchの1次平均振幅と最大傾斜角を示す。

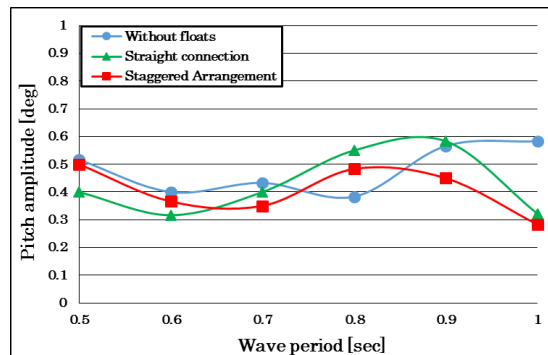


Fig.9 Pitch amplitude in wave-wind coexisting field

Fig. 9 から風抗力が作用することで波浪単独試験に比べて全体的に pitch 振幅が減少していることがわかる。波周期 0.8[sec]では浮体の同調により浮体を設置したケースの 1 次振幅が増大している。短周期では浮体の寄与はほとんどなく、長周期での動揺振幅は減少傾向にある。

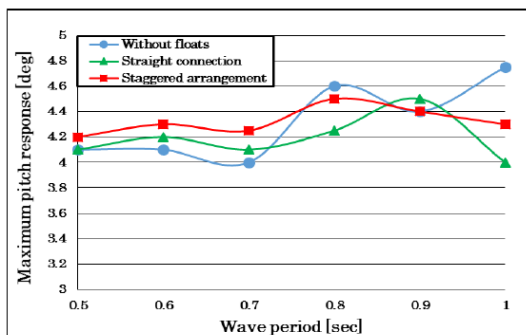


Fig.10 Maximum pitch response in wave-wind coexisting field

また、Fig. 10 から最大傾斜角は風による定常静傾斜が支配的となり浮体の設置による寄与は小さいことがわかる。定常静的傾斜角が 3.2[deg] ~ 3.5[deg]程度存在し、そこに動的な傾斜が加わり、最大傾斜角は 4.0[deg]から 4.8[deg]で推移している。surge についても同様の傾向があり、最大漂流距離は 13[cm]前後に及んだが、浮体の設置による 1 次振幅の低減への寄与は小さいため、最大応答変位に大きな差は見られなかった。heave には風の作用による大きな影響は確認されなかった。これらの水槽試験から、洋上風車と共に設置した波力発電用浮体により、波浪中での風車の surge・heave・pitch 運動の動揺振幅を減少させることが実験的に確認できた。しかし、浮体の同調周期付近で風車の運動が増大する傾向もあり、このことを考慮して浮体式波力発電の型式や配置の仕方をさらに検討する必要があると言える。今回の実験では簡易的なモデルを使用したため、波力発電の特性が現れていない部分もあり、今後波力発電の機構を有する模型を用いた詳細な検証が必要である。

4.3 結 言

本研究では浮体式洋上風力発電と浮体式波力発電による複合発電ファームの開発を目的として、模型を用いた水槽試験により基礎的な検証を行った結果、以下のような結論が得られた。

- 1) 波浪単独試験において、風車の周辺に波力発電用浮体を設置することで風車の 1 次 heaving 運動と pitching 運動を低減させることが確認できた。特に長周期においては 30% ~ 50%ほどの減少が確認できた。しかし、浮体を設置した際に周期 0.8 秒付近で比較的応答が大きくなっていることから、浮体の同調が消波を妨げている可能性がある。また surge については 1

次振幅にはあまり変化が見られなかったが、短周期において風車の最大漂流距離が抑えられていることが確認できた。

- 2) 風車の波浪中での運動として、heave では定常運動になる前に過渡状態となり、大きな過渡応答変位が確認できた。浮体の設置は特にこの過渡応答の減少に大きく寄与していた。波浪単独試験において、波高 6.0cm とした場合においても heaving 運動については 1 次振幅が最大 60%程度低減できており、過渡応答もほとんど見られなかった。surge と pitch には大きな過渡応答は見られなかった。
- 3) 風波共存場試験においては風抗力により pitch の 1 次振幅が減少していることが確認された。周期 0.8 秒では浮体を設置しない場合よりも設置した場合において 1 次振幅が増大していた。風による静的傾斜角が支配的となるため、最大傾斜角の減少への寄与は小さかった。surge にも同様の傾向が見られ、heave には風の影響はあまり見られなかった。
- 4) 浮体の設置の仕方として、直列配置と千鳥配置を行ったが、風車の運動に着目した今回の実験結果だけでは優劣をつけることはできなかった。また波浪中での運動により浮体どうしの接触が見られたので、係留方法や浮体どうしの間隔についても、検討が必要であると言える。
- 5) 洋上風車と波力発電装置の適切な位置関係を探索するために水槽試験だけでなく数値計算により波浪中で動揺する浮体周りの流場を把握し、ファーム形成のための適切な配置や浮体形状などについて今後調査する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 矢後清和 大川豊 鈴木英之 澤井貴之、浮体式風力発電システムに関する基礎的検討、第 17 回海洋工学シンポジウム、2003
- 2) 矢後清和 大川豊 大田真 中条俊樹 西村洋佑、浮体式風力発電用基盤浮体に関する基礎的検討、第 18 回海洋工学シンポジウム、2005
- 3) 鈴木克己 窪木利有 永田修一 瀬戸口俊明、2 次元数値解析による浮体型波力発電装置特性の妥当性と最適形状の検討、OTEC Vol.12 (2006), 17-24
5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 12 件)

Katsunari Fujioka, Yasunori Nihei, Marc Le Boulleuc, Discussion on hybrid utilization for offshore wind and wave energy, ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp.1-7(2015) (査

読有)
Yasunori Nihei, Kazuhiro Iijima, Motohiko Murai, Tomoki Ikoma, A Comparative Study of Motion Performance of Four Different FOWT Designs in Combined Wind and Wave Loads, ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp.1-10(2014) (査読有)

Chong Ma, Kazuhiro Iijima, Yasunori Nihei, Strongly coupled method for predicting the response of flexible FOWT with mooring and its experimental validation, ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp.1-8(2014) (査読有)

Qiao Li, Kohei Sugata, Yasunori Nihei, Yoshiho Ikeda, Motion characteristics of FLNG systems under the effects of drift motions of two floating bodies, Jurnal Teknologi, Vol.66, pp.41646 (2014) (査読有)

Yasunori Nihei, Tomoki Ikoma, Minori Kozen, Fumiya Sato, Motohiko Murai, Kazuhiro Iijima, Designing Process and Motion Characteristics of Spar type Offshore Wind Turbines, ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp.1-9 (2013) (査読有)

Yasunori Nihei, Midori Matsuura, Motohiko Murai, Kazuhiro Iijima, Tomoki Ikoma, New design proposal for the TLP type offshore wind turbines, ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp.1-10 (2013) (査読有)

二瓶泰範, 松浦みどり, 村井基彦, 居駒知樹, 飯島一博, TLP 型洋上風力発電の設計と水槽試験を通した 6 自由度運動特性に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 16 号, pp.445-448(2013) (査読無)

二瓶泰範, 幸前穂, 村井基彦, 居駒知樹, 佐藤史弥, 飯島一博, Spar 型浮体式洋上風車の設計と水槽試験を通した 6 自由度運動特性に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 16 号, pp.449-452 (2013) (査読無)

[学会発表](計 12 件)

Katsunari Fujioka, Yasunori Nihei, Marc Le Boulluec, Discussion on hybrid utilization for offshore wind and wave energy, OMAE 2015 34nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 31st May - 5th June 2015, St. John ' s Newfoundland, Canada

水上裕貴, 二瓶泰範, 原尚之, 飯島一博, システム制御情報学会研究発表講演会, 2015 年 5 月 20 日 ~ 22 日, 中央電気倶楽部 (大阪府, 大阪市)

Yasunori Nihei, Kazuhiro Iijima, Motohiko Murai, Tomoki Ikoma, A Comparative Study of Motion Performance of Four Different FOWT Designs in Combined Wind and Wave Loads, OMAE 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 8th - 13th June 2014, San Francisco (USA)

Chong Ma, Kazuhiro Iijima, Yasunori Nihei, Strongly coupled method for predicting the response of flexible FOWT with mooring and its experimental validation, OMAE 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 8th - 13th June 2014, San Francisco (USA)

Yasunori Nihei, Tomoki Ikoma, Minori Kozen, Fumiya Sato, Motohiko Murai, Kazuhiro Iijima, Designing Process and Motion Characteristics of Spar type Offshore Wind Turbines, OMAE 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 9th - 14th June 2013, Nantes (France)

Yasunori Nihei, Midori Matsuura, Motohiko Murai, Kazuhiro Iijima, Tomoki Ikoma, New design proposal for the TLP type offshore wind turbines, OMAE 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 9th - 14th June 2013, Nantes (France)

二瓶泰範, 幸前穂, 村井基彦, 居駒知樹, 佐藤史弥, 飯島一博, Spar 型浮体式洋上風車の設計と水槽試験を通した 6 自由度運動特性に関する研究, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2013 年 5 月 27 ~ 28 日, 広島国際会議場 (広島県, 広島市)

二瓶泰範, 松浦みどり, 村井基彦, 居駒知樹, 飯島一博, TLP 型洋上風力発電の設計と水槽試験を通した 6 自由度運動特性に関する研究, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2013 年 5 月 27 ~ 28 日, 広島国際会議場 (広島県, 広島市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二瓶 泰範 (Nihei Yasunori)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 00470055