

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360202

研究課題名 (和文) 浮体式洋上風力発電の動的応答と成立性評価に関する研究

研究課題名 (英文) Dynamic response and technical feasibility of a floating offshore wind turbine

研究代表者

宇都宮 智昭 (UTSUNOMIYA TOMOAKI)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10211773

研究成果の概要 (和文)：浮体式基礎を利用した洋上風力発電施設の実現に向け、1) 設計の基本ツールとなる、浮体基礎、係留系、タワー、風車を一体とした連成振動予測技術の開発、2) 施工性がよく、大量生産時に大幅なコスト低減が見込める構造として、下部をプレキャスト PC セグメント、上部を鋼製としたハイブリッドスパー構造を開発し、その 1/10 モデルによる実海域実験を実施、3) 想定海域の設計波浪推算システムの開発、等を行った。

研究成果の概要 (英文)：The final objective of this study is to realize a floating offshore wind turbine. The main results are as follows: 1) A tool for dynamic response prediction of a coupled system of floating foundation, mooring system, tower and wind turbine has been developed, 2) A hybrid Spar composed of precast PC segments at the lower part and steel at the upper part has been developed and on-sea experiment using a 1/10 scale model has been successfully been made, and 3) A prediction system of design waves at a site has been developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2009 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：洋上風力発電、浮体構造物、スパー、波浪推算、洋上風況、ウィンドファーム、再生可能エネルギー、連成振動

1. 研究開始当初の背景

欧州においては、着床式基礎による大規模な洋上風力発電ファームが多数実現しているが、水深 50m を超えれば着床式ではなく浮体式基礎がコスト的に有利となる。欧州と異なり、遠浅の海域が少ないわが国においては、浅海域に限ったのでは十分な風力エネルギー賦存量が見込めないため、浮体式基礎形式による洋上風力発電施設の開発を進める必

要がある。既に、浮体式洋上風力発電に関する研究がいくつか行われているものの、これまでは主として技術的な成立性についての検討がおこなわれている段階で、施工性やコスト面からは未だ検討すべき課題が多い。特に、建設費の大幅なコストダウンが必須といえる。以上の観点から、大幅なコスト低減が図れる構造として、プレキャスト PC セグメントを用いた円筒型スパーを浮体基礎とす

る洋上風力発電施設について検討する。また、浮体式洋上風力発電施設の設計を実施する上で、風車・浮体・係留系からなるシステムの連成振動を予測することが基本的に重要であるが、これが未整備であり、新たに開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、浮体式基礎を利用した洋上風力発電施設の実現に向けて、①低コストな浮体式洋上風力発電施設の基本コンセプトの策定とその成立性の検討、②設計の基本ツールとなる、浮体基礎、係留系、タワー、ブレードを一体とした連成振動予測技術の開発、の2点に重点をおいた研究をおこなう。①に関しては、施工性がよく、大量生産時に大幅なコスト低減が見込める構造として、プレキャスト PC セグメントを利用した円筒スパーク型浮体基礎を検討対象とする。また、②においては、不規則な波、風、潮流といった外力を適切にシミュレーションした上で、風車稼働・停止状態それぞれにおける連成振動を正確に予測するシミュレーションプログラムの作成とその実験的検証をおこなう。また、実機レベルでの実海域実証実験に向けて、2MW ダウンウィンド型風車を搭載する円筒スパーク型浮体基礎の約 1/10 モデルを用いて洋上実験を実施し、製作性を含めた本コンセプトの基本的成立性を実証的な方法論により確認する。最終年度においては、実海域実証実験実施のための基礎検討を実施する。

3. 研究の方法

年度毎に、それぞれ以下に示すサブテーマを設定し、それぞれを研究代表者、研究分担者、連携研究者および研究協力者で分担・連携しながら実施した。また、全体会合を2ヶ月に1回程度のペースでおこなった。

(1) 平成 20 年度サブテーマ

- ①プレキャスト PC セグメント工法によるスパーク型洋上風力発電用基盤浮体の開発
- ②合成繊維索と投げ込み式アンカーを用いた新形式係留法の検討
- ③係留、浮体、タワー、ブレードを一体とした連成振動シミュレーションプログラムの開発
- ④風と波を同時に受けるスパーク型浮体の動揺特性に関する実験
- ⑤風車の動揺制限値の把握・浮体動揺時の風車機械系、ブレード、タワーの疲労評価
- ⑥実証実験サイト選定のための洋上風況と波浪の推算

(2) 平成 21 年度サブテーマ

- ①想定実機の 1/10 モデルによる洋上実験の実施

- ②係留、浮体、タワー、ブレードを一体とした連成振動シミュレーションプログラムの開発

- ③新形式係留法の検討

- ④洋上風況・波浪推算法の実測による検証と予測精度の向上

- ⑤100kW 級風車を搭載したスパーク型基礎による実証実験計画の策定

(3) 平成 22 年度サブテーマ

- ①社会的制約条件の調査

- ②自然環境条件の調査

- ③浮体式洋上風力発電施設に作用する外力の算定と基本設計

- ④洋上施工の基礎検討

- ⑤実証実験計画の素案作成

4. 研究成果

研究の主な成果を年度ごとに(1)～(3)に、得られた成果の国内外における位置づけとインパクトを(4)に、今後の展望を(5)に示す。

(1) 平成 20 年度

①～⑥それぞれに対する成果は以下のとおり。

- ①プレキャスト PC セグメント工法によるスパーク型洋上風力発電用基盤浮体の開発

2MW プロトタイプ概念検討をおこない、概算コストの算出をおこなった。また、実機の 1/22.5 モデルに対する水槽実験を行った。

- ②合成繊維索と投げ込み式アンカーを用いた新形式係留法の検討

SPAR 用合成繊維索、複合トート係留および最適チェーン係留の検討、サクシオン杭の貫入及び把駐力解析プログラムの開発、さらに損傷時係留解析を実施した。

- ③係留、浮体、タワー、ブレードを一体とした連成振動シミュレーションプログラムの開発

6 自由度剛体としての運動方程式に基づく波浪応答解析プログラムを開発し、1/22.5 モデルに対する水槽実験結果との比較をおこない、その精度の検証を行った。

- ④風と波を同時に受けるスパーク型浮体の動揺特性に関する実験

風を定常力として与えた上で、波と風の入射角度をパラメータとした水槽実験を実施し、シミュレーションプログラムの検証データを取得した。

- ⑤風車の動揺制限値の把握・浮体動揺時の風車機械系、ブレード、タワーの疲労評価

浮体動揺実験および解析結果に基づき、タワーの疲労評価を実施した。

- ⑥実証実験サイト選定のための洋上風況と波浪の推算

実証実験サイトを選定した上で、洋上風況および波浪推算をおこない、50 年再現期間に対する設計風速・波高を定めた。

(2) 平成 21 年度

①～⑤それぞれに対する成果は以下のとおり。

①想定実機の 1/10 モデルによる洋上実験の実施

ハイブリッドスパーの製作性や海域上での施工性も含めて実証するため、想定実機の 1/10 スケールモデルを用いた実海域実証実験を実施した。佐世保港の湾内、岸壁から 30m 沖合に、下部をプレキャスト PC セグメント、上部を鋼製とするスパー型浮体、鋼製タワー、定格出力 1kW の水平軸型風車および 3 本のアンカーチェーンと重力式アンカーを構成要素とする実証実機を設置し、約 3 週間にわたって自然外力下での浮体挙動等の計測を行った。本実験により、ハイブリッドスパーコンセプトの基本的な成立性を確認した。

②係留、浮体、タワー、ブレードを一体とした連成振動シミュレーションプログラムの開発

MATLAB を用いた浮体動揺解析プログラムにより、上記①の実験結果を再現し、プログラムの検証をおこなった。また、設計解析ツールとして、NREL/FAST プログラムに浮体動揺および係留解析プログラムを組み込むことで、連成振動解析プログラムの開発をおこなった。

③新形式係留法の検討

砂地盤用サクシオンアンカーの検討を実施した。

④洋上風況・波浪推算法の実測による検証と予測精度の向上

洋上での風況解析と波浪推算を実施し、想定海域における設計波高、設計風速を算出した。

⑤100kW 級風車を搭載したスパー型基礎による実証実験計画の策定

同基本計画を策定した。

(3) 平成 22 年度

①～⑤それぞれに対する成果（実施項目）は以下のとおり。

①社会的制約条件の調査

- ・漁業事業者の受容性調査
- ・景観に対する影響と地元住民および関連自治体の受容性調査
- ・その他法的規制に関する調査、等

②自然環境条件の調査

- ・気象再解析モデルによる設計風速の算定とその検証

- ・波浪シミュレーションによる設計波の算定とその検証、等

③浮体式洋上風力発電施設に作用する外力の算定と基本設計

- ・空力・流力・弾性・制御力一体解析モデルによる全体系応答予測と設計外力の評価

- ・簡易解析モデルによる強度評価と基本設計検討、等

④洋上施工の基礎検討

- ・洋上での浮体曳航・設置、タワー・風力発電機の取付施工に関する基礎検討

⑤実証実験計画の素案作成

本基礎検討を通じて、2MW クラスのハイブリッドスパー型浮体式洋上風力発電施設の技術的成立性を確認した。

(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

特に、1/10 スケールモデルによるハイブリッドスパーの洋上実験は、ハイブリッドスパーとしては世界初、また、浮体式洋上風力発電に関する洋上実験としては国内初であり、NHK ニュース、日経新聞をはじめとするマスコミでも報道され大きなインパクトがあった。また、本研究で開発した係留、浮体、タワー、ブレードを一体とした連成振動シミュレーションプログラムは、環境省の実施した平成 22 年度浮体式洋上風力発電実証事業委託業務（京都大学が受託）において設計の基本ツールとして活用され、本研究の究極の目的である浮体式洋上風力発電の実現に向けて大きく貢献した。

(5) 今後の展望

世界的にも浮体式洋上風力発電に関する開発が加速しているが、本研究で提案したハイブリッドスパー構造は経済的な浮体基礎構造として近い将来の実現が期待されている。

また、浮体式洋上風力発電の実用化にあたっては、発電・運用時における信頼性向上が大きな課題であり、そのためには精度のよい応答予測が基礎となることから、連成振動解析についてもさらなる高精度化が必要である。

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 11 件）

①Tracey H. Tom・池本 藍・間瀬 肇・安田誠宏・森 信人：台風シーズンにおけるリアルタイム波浪予測と精度検証，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 66，pp. 161-165，2010（査読有）

②間瀬 肇・紺野晶裕・森 信人・安田誠宏・Sheng Dong：洋上ウィンドファームサイトにおける波浪と風の解析，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 66，pp. 386-390，2010（査読有）

③松熊秀和, 宇都宮智昭: マルチボディダイナミクスによる洋上風力発電用浮体基礎の動揺解析、応用力学論文集, 土木学会、第13巻、1069-1078、2010 (査読有)

④宇都宮智昭, 佐藤郁, 野本禎久, 高瀬彦: ハイブリッドスパーの1/10モデルによる浮体式洋上風力発電に関する実海域実験、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第11E巻、147-148、2010 (査読無)

⑤吉田茂雄, 宇都宮智昭: スパー型浮体式洋上風車の動特性に対するロータ位置の影響、風力エネルギー、Vol.34, No. 3、108-115、2010 (査読有)

⑥Utsunomiya, T., Matsukuma, H., Minoura, S., Ko, K., Hamamura, H., Kobayashi, O., Sato, I., Nomoto, Y., Yasui, K., ON SEA EXPERIMENT OF A HYBRID SPAR FOR FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE USING 1/10 SCALE MODEL, Proc. of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2010-20730, 2010 (査読有)

⑦宇都宮智昭, 松熊秀和, 高瀬彦, 浜村英樹, 小林修, 佐藤郁, 野本禎久, 安井賢太郎: 洋上風力発電用ハイブリッドスパーの1/10モデルによる実海域実証実験、第31回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集、第31巻、205-208、2009 (査読無)

⑧間瀬肇, 森信人, 安田誠宏, 作中淳一郎, 宇都宮智昭: 北太平洋波浪解析値を用いた沿岸海域における設計波浪の算定システム、土木学会論文集 B2(海岸工学)、第65巻、146-150、2009 (査読有)

⑨宇都宮智昭, 佐藤朋希, 松熊秀和, 矢後清和: 洋上風力発電用スパー型浮体の波浪応答実験と解析、海洋開発論文集、第25巻、13-18、2009 (査読有)

⑩関田欣治, 大久保寛, 吉田茂雄, 北勝利: スパー型浮体を用いた洋上風力発電施設の係留検討について、海洋開発論文集、第25巻、377-382、2009 (査読有)

⑪安田誠宏, 山口達也, 島田広昭, 森信人, 間瀬肇: 浮体式洋上風力発電サイト選定のためのWRFによる風況解析および波浪推算、海洋開発論文集、第25巻、879-884、2009 (査読有)

⑫Utsunomiya, T., Sato, T., Matsukuma, H., Yogo, K.: Experimental Validation for

Motion of a SPAR-type Floating Offshore Wind Turbine Using 1/22.5 Scale Model, Proc. of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2009-79695, 2009 (査読有)

⑬Utsunomiya, T., Nishida, E., Sato, I., Wave Response Experiment on SPAR-type Floating Bodies for Offshore Wind Turbine, The Proceedings of The Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference, (CD-R), 2009 (査読有)

[学会発表] (計4件)

①宇都宮智昭: ハイブリッドスパー型浮体式洋上風力発電の実証実験 (招待講演)、海洋再生可能エネルギーの利用に関するワークショップ、2010年12月1日、九州大学西新プラザ

②Utsunomiya, T., Research and Development of a Hybrid-Spar for Floating Offshore Wind Turbine (招待講演), IEA R&D Wind Task XI, TEM # 63, 2010年9月21日, Trondheim, Norway

③宇都宮智昭: 浮体式洋上風力発電プラットフォームの実海域実験 (招待講演)、第40回海洋工学パネル、日本海洋工学会、2010年7月30日、東京

④宇都宮智昭, 箕浦慎太郎, 松熊秀和, 高瀬彦, 浜村英樹, 小林修, 佐藤郁, 野本禎久, 安井賢太郎: 洋上風力発電用ハイブリッドスパーの1/10モデルによる実海域実験、京都大学防災研究所平成21年度研究発表講演会、2010年2月24日、京都大学防災研究所

[図書] (計1件)

①宇都宮智昭, 佐藤郁, 野本禎久, 高瀬彦, サイエンス&テクノロジー、海洋再生エネルギーの市場展望と開発動向、2011、472p (187-193)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇都宮 智昭 (UTSUNOMIYA TOMOAKI)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 10211773

(2) 研究分担者

関田 欣治 (SEKITA KINJI)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号: 90287045

(H20~H21)

間瀬 肇 (MASE HAJIME)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号：30127138
(H20～H22)

石田 茂資 (ISHIDA SHIGESUKE)
独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開
発系・グループ長
研究者番号：30360712
(H20～H22)

矢後 清和 (YAGO KIYOKAZU)
独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開
発系・主任研究員
研究者番号：50399515
(H20～H21)

池上 国広 (IKEGAMI KUNIHIRO)
長崎総合科学大学・工学部・教授
研究者番号：70320405
(H22～H22)

(3)連携研究者

森 信人 (MORI NOBUHITO)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号：90371476
(H20～H22)

安田 誠宏 (YASUDA TOMOHIRO)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号：60378916
(H20～H22)

井上 俊司 (INOUE SHUNJI)
独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開
発系・上席研究員
研究者番号：50575157
(H22～H22)

(3)研究協力者

戸田建設株式会社
富士重工業株式会社
新日鉄エンジニアリング株式会社
佐世保重工業株式会社
双日九州株式会社
日本ヒューム株式会社
ジェイ・パワーシステムズ株式会社
財団法人ながさき地域政策研究所