

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02367

研究課題名(和文) 大型風車の大規模展開のための巨大洋上プラットフォーム技術の開発

研究課題名(英文) Development of Mega Platform Technology for Large Scale Deployment of Offshore Wind Turbines

研究代表者

飯島 一博(Iijima, Kazuhiro)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50302758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、最大数キロメートルのオーダーの巨大プラットフォームを、浮体式洋上風車によるウィンドファームのために展開する場合の技術的課題の抽出と解決を図ることを目的とする。大きく非一様構造の流力弾性応答解析による建造シミュレーションと解析技術の検討、デジタルツイン技術を援用した応答モニタリングと将来予測によるメンテナンス技術検討、巨大プラットフォームの非線形挙動解明、の各要素研究を実施した。シミュレーションを併用した洋上プラットフォームの建造、デジタルツイン技術を利用したO&M技術の可能性が示された。また、それぞれに必要な解析コードの整備を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内閣府により策定された第3期海洋基本計画は、洋上風力発電のポテンシャルの大きさを指摘し、洋上風力の最大限導入拡大と国民負担の抑制を両立するべく、発電コストを一層低減させつつ、更なる導入拡大を図ることを謳っている。2023年に第4期の海洋基本計画が閣議決定され、洋上風力発電所の設置場所をEEZまで広げる法整備を進めると明記された。今後、洋上風車ウィンドファームの実証プロジェクトが実現してくるものと思われる。本課題研究はウィンドファームへの巨大プラットフォーム利用を検討し、O&M基地の可能性を指摘した。研究成果はEEZにおけるウィンドファーム展開にも役立つものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research project is to identify and solve technical issues in the case of deploying a large platform of the order of a few kilo-meters maximum for a large wind farm with floating offshore wind turbines. The following three major elemental studies were conducted: (1) simulation of floating structure under construction, using hydroelastic response analysis code and considering non-uniformity of the structures, (2) investigation of maintenance techniques using digital twin technology for response estimation and future prediction, and (3) clarification of the nonlinear behavior of large platforms under large extreme waves by using tank test measurement and theoretical developments. The possibility of simulating the building process of offshore platforms and O&M technology with digital twin technology was highlighted and demonstrated. In addition, the necessary analysis codes for each were developed.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：浮体式洋上風車 巨大プラットフォーム 流力弾性 複合荷重応答 連成応答解析 非線型波

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

内閣府により策定された海洋基本計画(2019年5月)は、洋上風力発電のポテンシャルの大きさを指摘した。同計画では、最大限導入拡大と国民負担の抑制を両立するべく、発電コストを一層低減させつつ、長期エネルギー需給見通しの水準の実現を目指し、更なる導入拡大を図ることを謳っている。風車単体としての技術開発から、大規模なウィンドファームまでの拡張を考えたとき、一層のコストダウンの必要性を意識する必要がある。浮体コストはおおよそ排水量で決まる。風車が大型化しそれを支持する巨大な浮体プラットフォームも大型化したとき、復原モーメントを得ることは相対的に容易になるので、風車一基当たりの排水量を極限まで減ぜられることが期待されよう。洋上風車の巨大化は運動性能の点では歓迎される一方、強度上の問題を提起する。また他方では、浮体式洋上風車の支持基盤として用いられる巨大プラットフォームは、複数機の風車を搭載することも考えられ、さらに大型化してウィンドファームの水素変換施設やメンテナンス基地としても用いられるだろう。以上から、巨大プラットフォームを浮体式洋上風車によるウィンドファームに展開する際の問題点を解決するための研究に思い至った。

2. 研究の目的

洋上風車を大規模に展開する際、巨大プラットフォームの利用が必須となる。そこで、本申請研究では、最大数キロメートルのオーダーの巨大プラットフォーム上をウィンドファームに展開する場合の技術的課題の解決を図ることを目的とする。技術課題を俯瞰したとき、巨大プラットフォームについて建造法(応答解析技術)、メンテナンス技術、巨大プラットフォームの挙動解明を挙げ、それぞれに対して検討を行う。各課題の中で、非一様構造の流力弾性応答解析による建造シミュレーションと解析技術の検討、デジタルツイン技術を援用したメンテナンス技術検討、巨大プラットフォームの挙動解明、の要素研究を実施する。ここで項目のデジタルツイン技術は構造について限定箇所の計測を行い、一方でデジタルモデルによるシミュレーションを行い、さらにシミュレーション結果を計測データで更新することで、対象構造物全体を確度高く管理する技術である。これらの技術検討に基づき、大型風車の大規模展開のための巨大洋上プラットフォームによるウィンドファームのコンセプトを提案する。個別の解析(Analysis)開発そのものよりも、複数の解析技術により工学的統合化(Synthesis)を行うことに主眼を置く。

3. 研究の方法

まず、研究対象となる巨大プラットフォームの二つのコンセプトを決定する。ひとつは大型の洋上風車を搭載するための沖合設置型のプラットフォームである。5MW-10MW 超の一基の風車をひとつの浮体上に設置し、これを多数設置してウィンドファーム化する。もう一方は、ウィンドファームを支援する巨大プラットフォームである。次いで、これらの解析法について検討する。風波複合荷重下の浮体式風車の応答解析法を検討し、さらに巨大プラットフォームの建造を解析するための、モード法に基づいた流力弾性応答解析プログラムを整備する(課題1)。それぞれSSODACとNKUTWindの解析コードを用いる。さらに、建造や安全性モニタリングのためのデジタルツイン技術の開発を進める。カルマンフィルタにより、あらかじめ得ておいた応答関数をもとに現地観測結果を同化させることで、入力である波浪を逆推定する解析方法を提案する(課題2)。最後に巨大プラットフォームの挙動解明のため、ポンツーン型の帯状の浮体模型を二次元水槽において試験しプラットフォーム上のたわみ波動計測を行う。DIC(Digital Image Correlation)計測を適用することで、多点の変形計測が可能となり、従来計測することのできなかった大型浮体の詳細な変形現象を捉えることが期待される(課題3)。

4. 研究成果

本研究の各研究要素課題について成果を以下に示す。当初想定していなかった面での成果も得られている。

(1) プラットフォーム応答解析技術

(1a) 巨大プラットフォーム建造シミュレーション

構造剛性の一部が低減した大型浮体についてモード法を援用した手法の検討を行い、ポンツーン型巨大プラットフォームの建造時のシミュレーションを行った。ここで低減した剛性は、ユニットを洋上接合して巨大プラットフォームを建造していく際の、継手(ストロングバックなど)による仮固着をモデル化するものである。同箇所は変位上のクライテリアと強度上のクライテリアを同時に満たす必要がある。建造が可能な波高クライテリアを合理的に定めること、あわせて構造の変形・応力の照査することを検討した

Joining two same float units with temporal structures

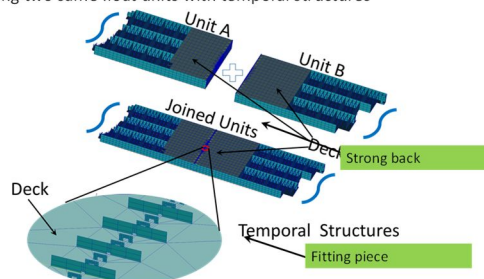


図1 巨大プラットフォーム建造モデル

図1は二つの浮体ユニットを洋上接合し、巨大プラットフォームを形成する際に、一部を継手で仮接合したときのモデルを示す。このモデルによって、波浪中弾性応答をシミュレーションしたところ、相対変形量をおおむね0.2mm以内に収めることができ、かつ構造上の安全性も保たれることがわかった。相対変形量は波向きに拠っており、斜め波が最も厳しい。また、今回のシミュレーションでは有義波高0.5mを想定した。同シミュレーション法は、大型浮体の建造シミュレーションに供することが可能であると結論した。SSODACと称する解析ツールを用いた。

(1b) 風波複合荷重下の浮体式洋上風車の解析技術

風荷重部分についてはFASTを用い、浮体運動部分にはモリソン式もしくはポテンシャル理論を用いる、浮体式洋上風車の複合荷重下の弾性応答解析コード(NK-UTWind)の適用性について検討を行った。別途実施した水槽試験データとの比較を通して、運動応答ならびに構造応答の解析が可能であることが示された。構造応答に関するシミュレーションは実験と比較したときに一部定量的な誤差が見られた。以降、同解析ツールを浮体式洋上風車の応答解析に用いた。

(2) デジタルツイン技術

(2a) カルマンフィルタによる波浪場推定

洋上接合時あるいはメンテナンス時に数か所のひずみや変位加速度応答の観測から巨大プラットフォーム中に生じている全事象を把握できれば効率的な運用に繋がる。本研究ではカルマンフィルタを用いて、あらかじめ得ておいた応答関数をもとに、現地での観測結果とシミュレーションを同化させることで、波浪場の時系列をリアルタイムで逆推定することを試みた。得られた波浪場の下でシミュレーション(順解析)することで巨大プラットフォームの任意の個所の構造変形状態が推定できる。過去に実施された浮体式洋上風車の縮尺モデルによる水槽試験ならびにシミュレーション結果を対象とし、同手法が動作することを示した。長波頂不規則波、ついで短波頂不規則波の推定を行った。図2は3本のコラムに支持される、半潜水式の風車プラットフォームのタワー付け根部の応力応答を観測することで、浮体に入射する入射波を推定した結果と(prediction)、シミュレーションで用いた入射波(reference)を比較するものである。提案手法を用いて、入射波が精度良く推定できることが示されている。

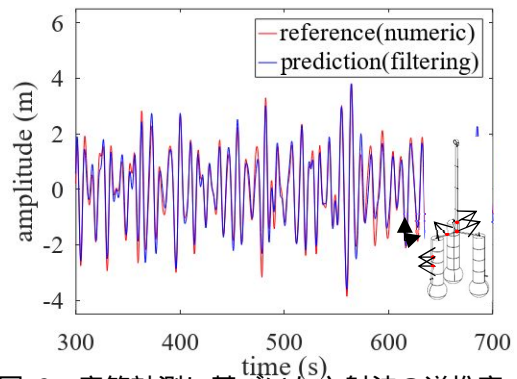


図2 応答計測に基づいた入射波の逆推定

一方で波浪場の推定精度は応答関数の精度によっていること、線形性を仮定するカルマンフィルタの理論限界から応答の波浪に対する非線形性が顕著な場合には適用が困難であることがわかった。浮体式風車の支持浮体の設計によっては、同調応答が問題になる場合が考えられ、モデル中の造渦などの非線形減衰係数の設定が波浪場推定結果に影響することが示された。

(2b) NNによる波浪場推定

上記(2a)の結果から対象とする系の非線形度合いが高い場合についても、波浪場の推定を可能とする手法の検討が必要であること見いだされた。そこで、ニューラルネットワーク(NN)の利用検討を行った。数点の応答(出力)と波浪(入力)を教師データとし人工知能(AI)に大量のデータを学習させることで、応答から波浪を逆推定することを試みた。Recurrent Neural Network(RNN)の一種であるLSTMを用い、波浪の時系列を高い精度で推定できることが示された。一方で、膨大な学習データが必要であること、また学習に時間が掛ることが欠点として挙げられた。

(2c) 将来予測技術

上記(2a)では不規則波を規則波にフーリエ展開したときの係数がわかるので、これをそのままにわたって用いれば、波浪場や応答の将来予測できる。このような将来予測を行った時、10秒程度先までであれば精度高く、波浪ならびに応答を推定できることが示された。この将来予測は例えばブレードピッチ制御に用いることができると考えられる。一方で、将来予測が可能な時間には限界があり、これは二点間の信号の相互相関関数の性質から説明がつけられる。一方で、さらに先の将来予測が必要となる場合がある。そこで、ウィンドファーム内で複数の巨大プラットフォーム(浮体式洋上風車)がある場合に、浮体間で波が伝播する時間を利用することで、ある一点での波浪時系列から他点での将来の波浪時系列を予測することが考えられた。これは前述の相互相関関数の時定数を伸ばすことに相当する。将来予測をシミュレーションと水槽実験によって動作原理を確認した。

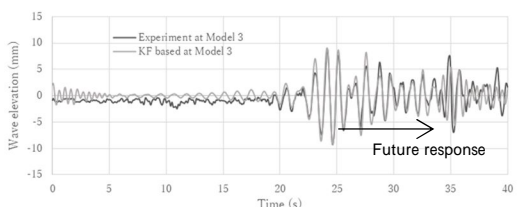


図3 応答の将来予測(縮尺1/100,実験結果)

図3は実機で700m(相当)離れた二点に配置された浮体式風車について、一方の運動から他方の運動を推定・将来予測したときの結果を示す。二点間の伝播時間を利用したとき、将来予測が可能な時間は60秒程度(図は模型スケールで示されており、実機の60秒は模型の6秒に相

当)まで伸ばすことが示された。図は 25 秒までの観測結果を利用することで、25 秒から 10 秒弱(実機 100 秒弱)程度先の応答が予測されたことを示す。

(3) 巨大プラットフォーム上の波動

(3a) 動的変形の DIC 計測

巨大プラットフォームを巨視的に眺めると水面に浮かんだ弾性板としてモデル化される。このような弾性板の実験は過去多数行われたが、当時の計測では離散的に数点の応答を計測することに留まった。そこで本研究では DIC 装置を用いて弾性浮体の変形ならびにひずみの連続的・面的な計測を行った。DIC は画像処理技術であるが、時間をずらして多数画像を得れば、時空間的な変形分布が得られることとなる。計測の準備段階で、適切な弾性と質量を有する(浮くことができる)弾性模型の設計が課題となった。アクリルやウレタンなども検討し、最終的に発砲ゴム(CR ゴム)を用いることで、軽くよく撓む素材による模型の設計製作に成功した。このような水面に浮かぶ弾性板の時空間的な計測例は世界的にも前例がない。別途行ったレーザー変位計による変位計測結果と比較して、計測精度にも問題がないことが示された。課題点は一回に撮影できる画像の空間的な大きさに限界があること、画像を鮮明に撮影することでたわみの計測精度を確保しておかないとそれを微分して得られるひずみにはさらに大きなばらつきが生じ、計測の信頼性が失われることがわかった。図 4 はこのときの計測の様子を示す。

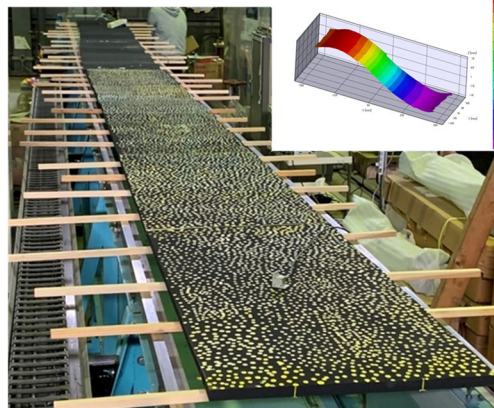


図 4 DIC を用いた計測の様子(模型上の黄色点は DIC 計測のための pattern)

(3b) 非線形波特性

上記(3a)は世界的にも例を見ない計測となった。この計測から浮体上のたわみ波動は入射による加振が正弦波的であっても、空間分布あるいは時刻歴は非正弦波的となり、非線形性があることが新たに発見された。理論的には自由表面における変形の有限性(微小でない)から生じたと考えられ、たわみ波動の振幅が大きくなるほどこの効果は顕著に表れる。自由表面上の Stokes 波と似た性質を持っているが、浮体上のたわみ波動の場合にはある特定の周波数で、非線形項が無限に発達する性質がある点で異なる。このことは計測でも確認された。水面に浮かぶ弾性板のモデルは、巨大プラットフォーム、メガフロートや氷板などにも当てはまり、これらの崩壊事象と関連する可能性が指摘される。さらに同理論を浅海域について検討し、浅海域に配置された巨大プラットフォームの Cnoidal 波理論に拡張させた。

(4) まとめ

以上を統合し、浮体式洋上風車によるウィンドファームへの展開に際して用いる、巨大プラットフォーム技術のコンセプトを提案した。ひとつは観測とシミュレーションを同化した洋上プラットフォームの建造、デジタルツイン技術を利用した O&M (Operation and Maintenance) 技術の可能性が示された。また、それぞれに必要な解析コードも整備された。他方で、本課題研究実施期間中に洋上風力への期待が一層高まった。2023 年 4 月には第 4 期の海洋基本計画が閣議決定され、洋上風力発電所の設置場所を排他的経済水域 (EEZ) まで広げる法整備を進めると明記された。本課題研究の成果は EEZ におけるウィンドファーム展開にも役立つものと考えられる。例えば O&M 基地としての巨大プラットフォーム技術利用が挙げられる。

本研究課題により見いだされた今後の研究課題として以下が挙げられる。

- 浮体式洋上風車の複合荷重下の応答解析コードの精度向上。シミュレーション技術をさらに向上させる必要がある。特に構造応答で一部定量的な誤差が見られ、流体力評価法の向上(例えば造渦減衰の評価)係留系と浮体の連成効果など依然として改善すべき点が挙げられる。
- ウィンドファームにおける巨大プラットフォーム利用法の検討。巨大プラットフォームは洋上風車自体の建造基地、中継・蓄電基地、水素などへの P2X 変換基地などとしての利用が可能であり、その利用法や建造法の検討を継続する必要がある。
- デジタルツイン技術や将来応答予測手法のさらなる展開。まず、手法自体を大型の水槽試験などで確かめることが必要であり、また制御やメンテナンス作業への応用検討が望ましい。
- 水面に浮かぶ弾性板の挙動解明。本研究課題で予想を超えて得られた新展開であり、自由表面に対する非線形性と同様の各種の検討が考えられる。不規則波下の応答への拡張、さらに確率的な面の検討が必要であり、そのための解析コード整備も望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Adilah Ahmad and Iijima Kazuhiro	4. 巻 27
2. 論文標題 A spectral approach for efficient fatigue damage evaluation of floating support structure for offshore wind turbine taking account of aerodynamic coupling effects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 408-421
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00773-021-00841-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Inoue, Ahmad Adilah, Kazuhiro Iijima, Sho Oh and Hideyuki Suzuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Discussion on Coupling Effect in Structural Load of FOWT for Condensing Wind and Wave Bins for Spectral Fatigue Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 937
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jmse8110937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Iijima, K, Ma Chong, Pambela, A.P., Maeda T.	4. 巻 266
2. 論文標題 DIC measurement of deflection waves travelling along a thin flexural plate floating at water surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 113079
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.oceaneng.2022.113079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Isnaini, R., Toichi, K., Iijima, K. and Tatsumi, A.
2. 発表標題 REAL-TIME PREDICTION OF INCOMING WAVE PROFILE SURROUNDING FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE USING KALMAN FILTER
3. 学会等名 OMAE2022, ASME（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上知哉、飯島一博、Adilah Ahmad、原健太郎、福王翔、鈴木英之
2. 発表標題 風・波複合場でのセミサブ型浮体式風車の応答評価実験における空力荷重特性のモデル化に関する研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Adilah Ahmad, 井上知哉、飯島一博
2. 発表標題 Evaluation of Long-term Fatigue Damage in a Semisubmersible Floating Structure Supporting Wind Turbine
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Isnaini, R, Toichi, K, Tatsumi A, Iijima K
2. 発表標題 Real-time wave prediction for floating offshore wind turbine based on the Kalman filter
3. 学会等名 5th International Conference on Renewable Energies Offshore
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toichi, K, Watanabe, Y, Tatsumi, A, Ishigami, Y, Matsuoka, R, Iijima, K.
2. 発表標題 Wind and wave identification from response measurement on a floating wind turbine
3. 学会等名 Global Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊遊
2. 発表標題 Neural Networkによる洋上浮体式風車に作用する環境荷重の推定
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会学生研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Soe Sandar Kyaw
2. 発表標題 Development of Cnoidal Wave theory for long floating plate
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会学生研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚本晃司
2. 発表標題 大型洋上風車の構造応答解析に関する研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会学生研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------