

3 海技研におけるこれまでの海洋再生エネルギー 研究の総括と将来展望

中條 俊樹*

Summary and Future Vision of Research Activities on
Ocean Renewable Energy in National Maritime Research Institute

by

CHUJO Toshiki

Abstract

For the past seven years, NMRI has been investigating ocean renewable energy as the first long term research plan. This paper presents a summary of the results and future research directions. First, floating offshore wind turbines (FOWTs) and wave energy converters (WECs) were mainly studied through model experiments and numerical simulations. Sophisticated coupling analysis techniques were developed, and even a unique concept such as a turret mooring FOWT could be analyzed. In addition, studies on designing and analyzing of mooring system with synthetic fiber ropes were conducted. Actual sea tests were carried out to measure the amount and the effect of rope strength due to marine growth. In the study on WECs, a new control algorithm of a float of point absorber type WEC was studied. The effect of this new control algorithm was verified through tank tests. Lastly, safety guidelines for floating ocean renewable energy systems were published on the basis of these results. In the future, NMRI aims to further study on ocean renewable energy toward commercial use in large scale. As of this year, the second long term research plan is in progress. The research on the cost reduction in large-scale wind farm has been planned, including the monitoring technology of mooring tensions based on floater displacement without direct measurement, the establish of selection methods of inspection targets in a large-scale wind farm. In addition, control algorithms will be studied to improve the power generation of WECs.

* 洋上風力発電プロジェクトチーム

原稿受付 令和5年5月 9日

審査日 令和5年5月29日

1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国にとって、海洋空間の有効利用は重要な課題であり、その中で海洋再生可能エネルギーの活用はエネルギー自給率の向上、エネルギーの地産地消等の観点から、きわめて有用である。海洋再生可能エネルギーを利用した発電は、洋上風力発電を中心に発展を続けており、複数の実証プロジェクトが実施された。我が国では、長崎県五島市沖¹⁾、福島県沖²⁾、北九州沖³⁾における浮体式洋上風力発電の実証プロジェクトの後、グリーンイノベーション基金事業⁴⁾において、大型風車を搭載した複数浮体を用いた実証事業が予定されている。一方、ヨーロッパではすでに、複数の風車・浮体から構成されるウィンドファームが商用運用されている⁵⁾⁶⁾。

波力発電や潮流・海流発電では、我が国においては実証試験が実施された⁷⁾他、多くのフィージビリティスタディが実施された。ヨーロッパでは、実機を用いた実証試験⁸⁾⁹⁾、商用運用¹⁰⁾が開始されたが、大規模な商用化には至っていない。

海上技術安全研究所（以下当所）では、これまで海洋再生可能エネルギーに関する様々な研究開発を実施してきた。例えば浮体式洋上風力発電分野においては、水槽模型試験技術に裏打ちされた連成解析手法、浮体式に対応したブレードピッチ制御技術、係留系の安全性評価技術の研究開発を中心に実施してきた。また、波力発電においては、可動物体型や屈曲型、後ろ曲げダクトブイ型等の様々な形式の水槽模型試験、特に可動物体型に対応した発電制御アルゴリズムの研究開発を実施してきた。その他、潮流・海流発電や海洋温度差発電についても波浪中の安全性評価を目的に水槽試験を中心とした研究を実施した。

今後、海洋再生可能エネルギーの普及拡大を図る上では発電コストの低減が不可欠であり、そのための技術開発が求められている。当所では、洋上風力発電においては単機の安全性評価から、ウィンドファームを対象とした研究、例えばウィンドファームにおける効率的な運用やウィンドファーム特有の現象（例えば後流影響や浮体漂流時の影響等）の解明に移行していくことが考えられる。また、波力発電等の風力発電以外の分野では、発電効率の更なる向上を実現していく必要がある。

本論文では、第1期中長期研究計画の7年間における研究成果を総括するとともに、当所の研究開発の将来展望を紹介する。

2. 海洋再生可能エネルギーについての研究開発

海洋再生可能エネルギーは表-1 に示すようにそのエネルギー源により大別され、それぞれの得失を考慮し適切に研究開発を進める必要がある。当所では浮体式洋上風力発電、浮体式波力発電を中心に、研究開発を実施してきた。第1期中長期研究計画においては、それぞれの分野で浮体式の発電施設に関する安全ガイドラインを主に作成した。

表-1 海洋再生可能エネルギーの主な特徴

形式	メリット	デメリット
風力発電	1基あたりの発電量が大きい。	風による変動性が大きい。
波力発電	波の統計的な予測は風力発電よりも容易である。	海象条件による変動が大きい。
海流・潮流発電	変動量が少なく、安定した発電が可能。	海域による偏在性が大きい。
海洋温度差発電	発電量が安定している。	海水温の高い海域に限られる。

3. 浮体式洋上風力発電に関する研究開発

本節では、浮体式洋上風力発電を構成する重要な要素に関する研究開発について紹介する。研究開発の成果は国際基準への適用、ガイドライン作成等で社会実装されている。

3.1 水槽模型試験および連成解析

浮体式洋上風力発電においては、風車-浮体-係留系に空力荷重、水力荷重、係留力が複雑に影響する、いわゆる連成影響を考慮して解析する必要がある。その際は時系列解析が一般的である。当所では、水槽模型試験による検証を経て、汎用の浮体-係留系の解析ソフトウェア¹¹⁾を用いた解析を実施している。また、タレット等の特殊な技術を適用した浮体式洋上風力発電についても機構解析ソフトウェア¹²⁾を用いた解析を行う等、様々な形式に対応可能となっている。図-1 は 1/15 縮尺模型を用いた水槽試験の様子と機構解析により試験を模擬した計算結果である。

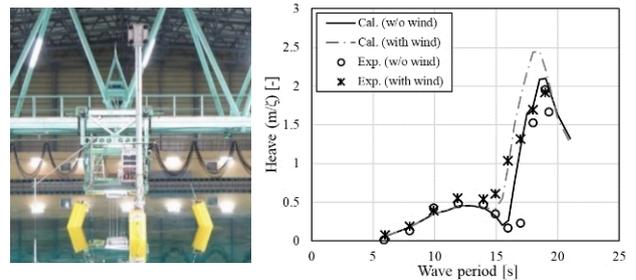


図-1 1点係留型の浮体式洋上風力発電の水槽試験の様子（左図）と機構解析による解析結果（右図）¹³⁾¹⁴⁾

3.2 ブレードピッチ制御

浮体式洋上風力発電においては、ネガティブ・ダンピング等の着床式風力発電とは異なる現象を考慮したブレードピッチ制御が求められる。当所では、数値解析に加え実機風車と同様の動作が可能な縮尺模型を製作し、数値解析に加え風洞試験、水槽試験による、浮体の動揺低減と発電量の安定を両立させたブレードピッチ制御アルゴリズムの開発を行っている。また、ブレードピッチ制御による浮体の動揺低減効果を考慮した浮体形状・寸法の最適化についても研究開発を

実施している。図-2 に米国再生可能エネルギー研究所（NREL）の開発した制御アルゴリズム（ROSCO）¹⁵⁾を用いた浮体寸法のパラメトリックスタディの結果を示す。これは、15MW 風車を搭載したセミサブ型浮体のローハル長さを変えながら制御パラメータを変更し、発電量変化を解析した結果の一部である。この解析ではこの他にコラム直径を変更し、制御パラメータを変更した際の浮体製造コストの推算結果、浮体主要部の疲労等を考慮し、合理的な制御パラメータや浮体寸法を導出した。

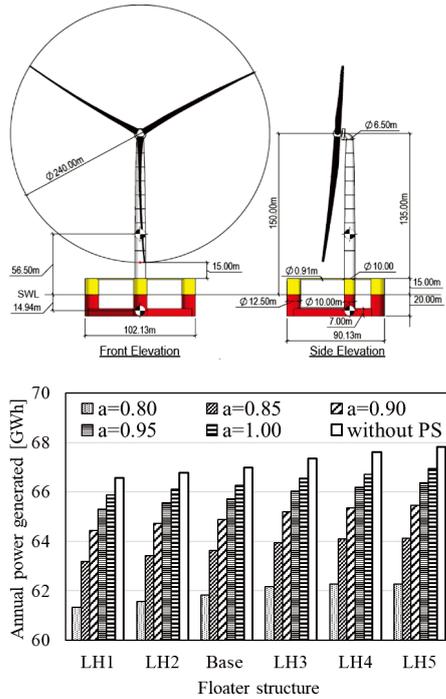


図-2 15MW 風車搭載のセミサブ型浮体¹⁶⁾（上図）とローハル長さを変更した場合の年間発電量¹⁷⁾（下図）

3.3 合成繊維索係留

浮体式洋上風力発電の実用化には係留系のコスト削減も重要であり、当所では合成繊維索係留に関する研究開発を実施している。多様な係留形式、係留索素材が存在し複雑な挙動を示す合成繊維索係留において、設計上の留意点を明確化するとともに、安全性を満たしながら経済性の観点でも合理的な係留仕様を算出するシステムの開発を実施している。図-3 はその際の試設計結果である。また、従来の鋼製チェーン係留と比較して係留張力や長期間の安全性に影響が大きいと考えられる生物付着についても、実海域における浸漬試験を実施し、その影響を評価している¹⁸⁾。今後より長期間の浸漬を行い付着量の評価と破断試験による強度評価を実施し、生物付着の影響を定量的に評価するが、執筆時点（2023年4月）においては図-4 に示すように海水温の高い海域の付着量が海水温の低い海域よりも大きい結果となっている。

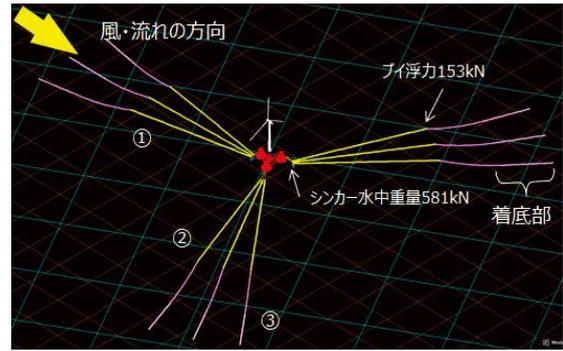


図-3 水深 64m における合成繊維索係留の設計例¹⁸⁾

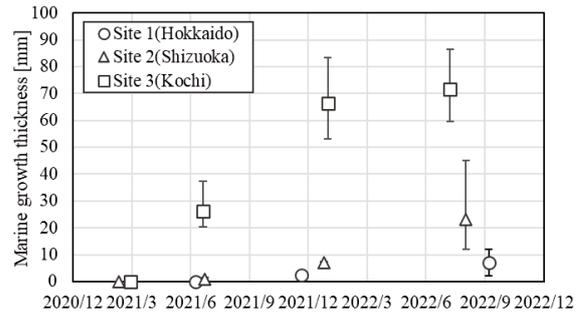


図-4 実海域浸漬試験による生物付着量の計測結果¹⁸⁾

3.4 衝突時復原性に関する研究成果の国際展開

従来の石油天然ガス開発のための海洋構造物と比較し、浮体式洋上風力発電は、通常時は無人である・事故時の環境への悪影響が少ない等の特徴があり、浮体外板の損傷に伴う浮体が有すべき復原性について、より合理的な基準について検討を行ってきた。浮体外板の損傷の主な原因となる船舶との衝突について、衝突確率に基づき防水隔壁設置の必要性を定める国内ガイドライン¹⁹⁾の改訂を行った。さらに、国際基準（IEC61400-3-2）においても我が国のガイドラインに基づく考え方²⁰⁾を提案している。

4. 波力発電等に関する研究開発

4.1 波力発電の高効率化を目指す制御の研究

当所では、複数ある発電方式の中で可動物体型に分類されるポイントアブソーバー型波力発電の研究開発を実施している。概念図を図-5 に示す。

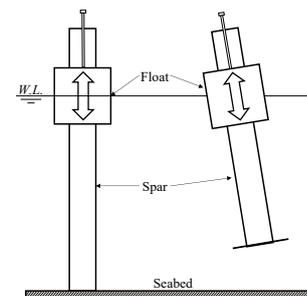


図-5 ポイントアブソーバー型波力発電の概念図

この方式では、稼働するフロートの制御が重要であり、そのため波の予測に基づくフィード・フォワード同調制御技術の研究開発を行った²¹⁾。さらに、フロートの可動範囲の制約条件や制御モデル化の誤差を考慮した制御ゲインの最適化を行い、従来の制御法よりも高効率な制御法（PS制御）を開発した²²⁾。

4. 2 日本周辺の波力発電ポテンシャル評価

日本周辺の波条件から複数海域で発電量評価を実施した。図には、4.1 に記述したフロートの制約条件を考慮した高効率な制御を用いた際の発電量マップの一部を図-6に示す。

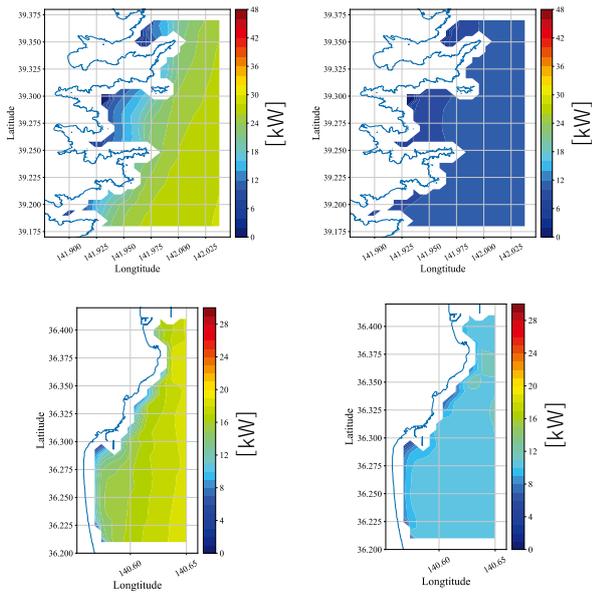


図-6 岩手県釜石式沖（上段）および茨城県大洗町沖（下段）のPS制御（左列）と銅損を考慮した同調制御（右列）の発電量の比較例

4. 3 浮体式潮流・海流発電に関する研究開発

当所では、浮体式潮流・海流発電の中で、ロータが回転する方式について、海中に浮遊する水平軸型と海面上に浮かぶ垂直軸型の2種類を対象に、水槽模型試験と数値計算を実施した。これら検討の結果から、安全性を照査する際の様々な留意点を抽出し、得られた成果をガイドライン²³⁾としてまとめた。図-7にそれぞれの方式の水槽試験模型を示す。



図-7 水平軸型の浮遊式潮流・海流発電模型²⁴⁾（左図）および垂直軸型の浮体式潮流・海流発電模型（右図）

4. 4 浮体式海洋温度差発電に関する研究開発

海洋温度差発電については、他の発電方式にない特徴として、大水深域から低温の海水をくみ上げるための大口径の取水管の存在がある。当所では、取水管の内部に流れる海水の有無に着目し、水槽模型試験と数値計算による安全性を照査する際の留意点を抽出し、得られた成果をガイドライン²³⁾としてまとめた。

5. 将来展望

これまで当所では、主に単独の浮体式の海洋再生可能エネルギー生産施設について、安全性評価を中心とした研究開発を実施してきた。今後は大規模な商用化を見据え、グリーンイノベーション基金事業等の国や民間企業の開発目標に連動して更なる研究開発を進めていく必要がある。

当所の策定した2023年度から2029年度までの7年間にわたる重点研究計画における海洋再生可能エネルギー分野の研究計画を図-8に示す。

Thema	Items	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
①大規模FOWTの安全性評価手法の構築	張力モニタリング手法	→	→	→	→	→	→	→
	合理的な検査対象選定手法			→	→	→	→	→
	浮体最適化支援技術					→	→	→
②合成繊維索を用いた係留システムの安全性評価手法の構築	係留仕様算出手法	→	→	→	→	→	→	→
	他要素相互影響評価			→	→	→	→	→
	生物付着影響評価	→	→	→	→	→	→	→
③デジタルツイン技術の構築	遭遇海象推定手法	→	→	→	→	→	→	→
	浮体応力推定手法	→	→	→	→	→	→	→
	係留張力推定手法	→	→	→	→	→	→	→
④波力・潮流発電等の安全性評価・性能向上研究	制御技術高度化	→	→	→	→	→	→	→
	複数基の安全性評価			→	→	→	→	→
	複合型システム					→	→	→

図-8 第2期中長期研究計画の線表

5. 1 浮体式洋上風力発電の研究計画

浮体式洋上風力発電の大規模な実用化においては、図-9に示すような急速な風車の大型化に対応するとともに、複数浮体で構成されるウィンドファームにおけるコスト削減に資する研究が重要と考えられる。既往報告²⁵⁾で示したように、発電コストは欧州のウィンドファームと同等程度を目指す必要がある。ただし、発電コストの低減は、浮体や係留といった個別要素のコスト低減に止まらず、設置やO&Mを含む

浮体式風力発電全体システムにおいて達成されなければならないものとする。

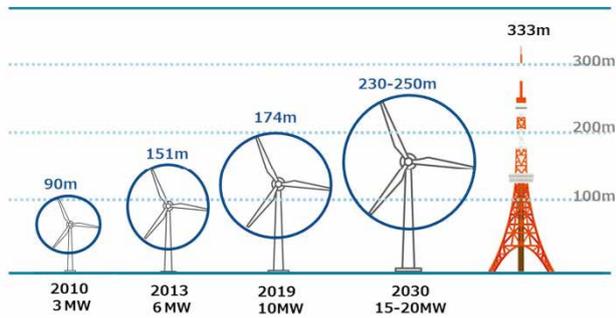


図-9 風車サイズの大型化の流れ²⁶⁾

重点計画のうち、浮体式洋上風力発電に関する研究は3項目あり、それぞれ

- ① 大規模ウィンドファームの安全性評価手法の構築
- ② 合成繊維索を用いた係留システムの安全性評価手法の構築
- ③ デジタルツイン技術の構築

となっている。①においては、O&Mコスト削減につながる係留索張力の直接の計測を代替する手法の開発、多数の浮体から合理的に検査対象を選定する手法の開発、製造コストそのものを低減させるための浮体の最適化に関する研究開発を実施する。②においては、設計コスト低減につながる、様々な水深や係留方式に対応する合成繊維索係留の簡便な設計仕様算出プログラムの開発を実施する予定である。さらに、合成繊維索を用いた係留索の強度への影響が懸念されている、海洋付着生物についても実海域試験を継続し、定量的な評価を行う計画である。

①では、例えば係留索張力について、これまでの実証事業で用いられた歪ゲージやロードセル等のセンサーによる係留索張力の直接計測に対し、浮体変位から係留索張力をモニタリングすることや係留系に発生した異常の検知技術について研究開発を行う。これは索張力を計測するセンサーが海洋環境下における故障・喪失のリスクが高いこと、故障・喪失の際のセンサーの交換も困難であることから、比較的入手性の良いGPS等による浮体変位データからの推算によって、係留索張力の直接モニタリングを代替するものである。

②では、合成繊維索を用いた係留系には様々な素材と係留形式が存在するため、適切な係留仕様の検討が容易ではない現状がある。これに対し、より簡便に計画初期段階における検討を可能にすることの出来る、係留仕様算出プログラムを作成する。これはできる限り計算負荷の少ないものとし、係留索の素材や係留方式を変更した際のコスト検討等にも使用可能なツールとして開発する計画である。

③では、図-10に示すような浮体運動から遭遇海象を推定

する手法の開発や浮体に発生する応力・係留索張力を推定し疲労余寿命を推算する、いわゆるデジタルツイン技術の開発を計画している。デジタルツイン技術により浮体に働く応力等を正確に把握すること、浮体構造や係留索の疲労余寿命を的確に把握することで、これまでよりも効率的なO&Mが可能になる等、運用コスト低減に貢献できると考えている。

これらの主要な技術についてはいずれも3年間程度で開発を完了し、その後、民間企業等の協力を得てグリーンイノベーション基金事業等における実海域の実証試験を経て、実用化、あるいはガイドライン化する方針である。

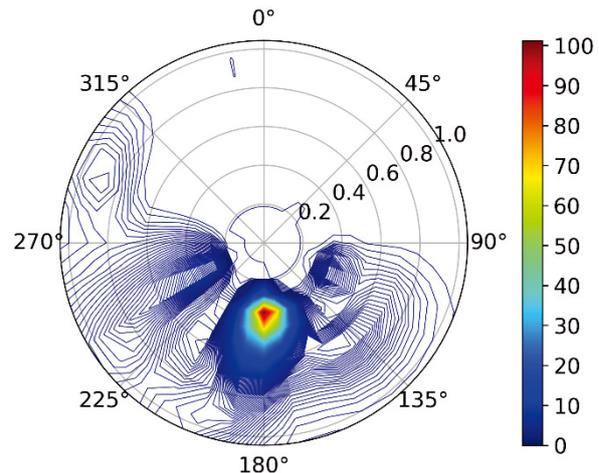


図-10 浮体式洋上風力発電の遭遇海象の推定結果例

5.2 波力発電等の研究計画

波力発電については国内における実海域試験への参画を目指し、高効率化に関する現在の研究を発展させる。また、複数浮体を連結させた場合の安全性評価や、他の発電方式との組み合わせによる発電量の増強についても順次研究を進める想定である。

6. まとめ

当所では、浮体式洋上風力発電、波力発電を中心に安全性評価、発電性能向上等に着眼した研究開発を実施してきた。7年間にわたる第1期中長期研究計画において、特に浮体単独の評価については水槽試験や数値計算により高い精度で評価可能となった。これらの成果の一部は国のガイドラインや国際基準に反映された。

2023年度から始まる第2期中長期研究計画においては、浮体式洋上風力発電については大規模ウィンドファームを想定した研究に移行し、実用化への貢献を目指す。波力発電等については効率化の更なる追及や実海域における実証試験への参画を通じて実用化へ貢献していく。

謝辞

本論文に示す研究成果については、図-1 は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP14022）の結果、図-3, 4, 7, 8 は国土交通省海事局からの受託研究、請負研究の結果得られたものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) 戸田建設 Web サイト,
https://www.toda.co.jp/business/ecology/special/windmill_02.html
- 2) 福島洋上風力コンソーシアム Web サイト,
<http://www.fukushima-forward.jp/>
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究,
<https://www.nedo.go.jp/floating/index.html>
- 4) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、洋上風力発電の低コスト化, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/offshore-wind-power-generation/>
- 5) Equinor Web Site, Hywind Scotland,
<https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland>
- 6) Principal Power Web Site, Kincardine Offshore Wind Farm,
<https://www.principlepower.com/projects/kincardine-offshore-wind-farm>
- 7) 株式会社 IHI プレスリリース,
https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2017/technology/1190413_1639.html
- 8) EMEC Web Site, Pelamis Wave Power,
<https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>
- 9) EMEC Web Site, Aquamarine Power,
<https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>
- 10) Alstom Website, <https://www.alstom.com/press-releases-news/2014/11/alstoms-tidal-turbines-have-generated-over-1gwh-to-the-scottish-grid>
- 11) Orcina, Orcaflex -World-leading software that goes beyond expectation
- 12) MSC Adams Web Site,
<https://www.mscsoftware.com/product/adams>
- 13) 中條俊樹, タレットを用いた一点係留方式の浮体式洋上風力発電について, 海洋エネルギーシンポジウム 2021 講演論文集, 2021.
- 14) 羽田絢, 中條俊樹, 藤原敏文, 機構解析による新形式 FOWT 浮体の波浪中動揺及び弾性体応答の評価に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集 2022 年 36 巻, pp. 101-109, 2022.
- 15) Abbas, NJ, Zalkind, DS, Paol L, and Wright, A, A Reference Open-Source Controller for Fixed and Floating Offshore Wind Turbines, WIND ENERGY SCIENCE DISCUSSIONS, 2021.
- 16) A., Christopher, A., Viselli, H., Dagher, A., Goupee, E., Gaertner, N., Abbas, M., Hall, and G., Barter: Definition of the UMaine VoltturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-76773, 2020.
- 17) 羽田絢, 中條俊樹, 吉本治樹ら, 浮体式洋上風力の浮体形状と風車制御設定のパラメトリックスタディ, 日本船舶海洋工学会論文集 (投稿中)
- 18) 中條俊樹, 黒岩隆夫, 浮体式洋上風力発電の促進のための技術開発, 令和 4 年度海上技術安全研究所研究発表会講演論文集, 2022.
- 19) 国土交通省海事局, 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン, 2014.
- 20) 中條俊樹, 羽田絢, 小森山祐輔ら, 浮体式洋上風力発電における IEC の新たな損傷時復原性規定の運用について, 日本船舶海洋工学会論文集 31 巻, pp. 171-182, 2020.
- 21) Koseki, T., Fujiwara, T., Umeda, J, and et al.: System Design and Output Energy Maximization Control of Ocean Wave Linear Generators as Sustainable Fundamental Energy Source, 2021 Fiscal Year Final Research Report, Japan Science and Technology, 2022.
- 22) Umeda, J., Fujiwara, T., and Taniguchi, T.: Short-term Prediction of Output Power and Constrained Optimal Control for Point-Absorber Type Wave-Energy Converters with Linear Generators, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 32 (2020), pp. 91-98.
- 23) 国土交通省海事局, 浮体式潮流海流発電施設技術基準安全ガイドライン, 2017.
- 24) Chujo, T., Haneda, K., Ishida, S., Matsui, R., Nimura, T., and Inoue, S., "Study on Safety Assessment of Floating Horizontal Axis Tidal Turbine with Tank Test," Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineering, 31, pp. 195-203, 2020.
- 25) 中條俊樹, 黒岩隆夫, 國分健太郎. 浮体式洋上風力発電の将来ビジョンと海技研の取り組み, 令和 2 年度海上技術安全研究所研究発表会講演論文集, 2020.
- 26) 経済産業省・国土交通省, 第 1 回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会作業部会資料, 2020.