

海洋再生可能エネルギーに係る基盤技術及び 安全性評価技術の開発に関する研究

藤原 敏文*, 中條 俊樹**, 谷口 友基***, 羽田 絢**, 平尾 春華**, 梅田 隼**,
蓮見 知弘**, 正信聡太郎****, 國分健太郎**, 湯川 和浩****, 大坪 和久****,
齊藤 昌勝****, 長谷川賢太****, 渡邊 充史****, 石田 圭****,
黒岩 隆夫****, 山田 安平****, 小森山祐輔****, 小島 隆志****,
伊藤 博子****, 三宅 里奈****, 河島 園子****

Research and Development on Fundamental and Safety Assessment Technologies for Ocean Renewable Energies

by

FUJIWARA Toshifumi*, CHUJO Toshiki**, TANIGUCHI Tomoki***, HANEDA Ken**,
HIRAO Shunka C.**, UMEDA Jun**, HASUMI Tomohiro**, MASANOBU Sotaro****,
KOKUBUN Kentaroh**, YUKAWA Kazuhiro****, OTSUBO Kazuhisa****,
SAITO Masakatsu****, HASEGAWA Kenta****, WATANABE Mitsushi****, ISHIDA Kei****,
KUROIWA Takao****, YAMADA Yasuhira****, KOMORIYAMA Yusuke****,
KOJIMA Ryuji****, ITOH Hiroko****,
MIYAKE Rina****, and KAWASHIMA Sonoko****

Abstract

This paper summarizes the research and development, i.e. R&D, of marine renewable energies over the past seven years, FY 2016-2022, in the National Maritime Research Institute. In the area of wind energy, performance and safety evaluations were conducted through tank tests with scale models and numerical simulations under conditions using synthetic fiber mooring ropes and others. In the field of wave energy, R&D has been conducted on point-absorber devices, mainly aimed at improving their power generation. R&D on ocean current and tidal power generation, and ocean thermal energy conversion facility was also conducted for future installations to ensure their safety in severe weather. The results of this R&D can contribute to the practical application of marine renewable energies in Japan.

* 研究統括監 (研究当時海洋先端技術系), ** 海洋先端技術系, *** 大阪公立大学 (研究当時海洋先端技術系),
**** 海洋先端技術系 (研究当時海洋開発系), ***** 海洋開発系, **** 構造・産業システム系,
***** 環境・動力系, ***** 海洋リスク評価系

原稿受付 令和 5年 10月 16日

審査日 令和 5年 11月 16日

目 次

1. はじめに.....	2
2. 洋上風力発電.....	3
2.1 数値連成解析技術・模型試験に関する研究開発.....	3
2.1.1 1点係留型浮体式洋上風力発電の水槽試験・数値連成解析.....	3
2.1.2 3翼独立制御風車模型を用いた風洞試験.....	4
2.2 風車ブレードピッチ制御に関する研究開発.....	5
2.3 合成繊維索係留に関する研究開発.....	6
2.3.1 設計上の留意点の抽出.....	6
2.3.2 係留合成繊維索に対する生物付着影響の評価.....	6
2.4 浮体式洋上風力発電施設の損傷時復原性に関する研究開発.....	7
2.5 浮体式風力発電の設置・維持管理に関する研究.....	10
2.5.1 CTVに関する研究.....	10
2.5.2 SEP 船に関する研究.....	11
2.5.3 浮体式風力発電の施工日数に関する検討.....	12
2.6 浮体式風力発電のまとめ.....	13
3. 波力発電.....	13
3.1 対象 PAWEC	13
3.2 着床式 PAWEC に関する研究開発	13
3.2.1 フィード・フォワード同調制御技術を用いたリニア式波力発電に関する研究開発	13
3.2.2 永久磁石式横磁束形リニア同期発電機を用いた波力発電に関する研究開発	14
3.2.3 PS 制御を用いた波力発電に関する研究開発	15
3.2.4 ベイズ最適化手法を用いた波力発電に関する研究開発.....	15
3.3 浮体式 PAWEC に関する研究開発	16
3.4 波力発電のまとめ.....	17
4. 海流・潮流発電.....	17
4.1 水中浮遊型水平軸型潮流・海流発電に関する研究開発.....	18
4.2 浮体式垂直軸型潮流・海流発電に関する研究開発.....	19
4.3 潮流・海流発電のまとめ.....	20
5. 海洋温度差発電.....	20
5.1 対象海洋温度差発電施設浮体と水槽試験.....	20
5.2 安全性評価のための数値計算.....	21
5.3 海洋温度差発電のまとめ.....	22
6. おわりに.....	23
謝 辞.....	23
References	23

1. はじめに

我が国では海洋政策に関連し、海洋再生可能エネルギー・海洋資源開発の促進、および海洋開発産業の育成、国際ルール形成への戦略的関与を通じた海事産業の国際競争力強化が求められている。併せて、海洋開発は民間での開発リスクが過大であるため、海洋開発推進、海洋産業の育成に向け、研究機関、行政、民間事業者の連携が必要である。

そのような状況の中、2016年から7ヶ年の計画としてスタートした国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所(以下、当所)の第1期中長期計画では、「船舶に係る技術を活用し、海洋基本計画等の国の施策に沿ったナショナルプロジェクト、海洋産業育成等への技術的貢献を行うとともに、実際の開発・生産を担う我が国企業への技術的支援が求められている。このため、海洋再生可能エネルギー生産システムに係る基盤技術及び安全性評価手法の確立に関する研究開発を実施する。」としている。当所では、この第1期中長期計画に基づき、浮体式を主体として風力発電、波力発電、海流・潮流発電、海洋温度差発電と様々な発電形式での性能向上のための基盤技術開発、安全稼働に必要な安全性評価技術の開発に関して取り組んできた。

他方、国の方針として、より一層、海洋再生可能エネルギーの獲得を目指すため、2018年(平成30年5月)に閣議決定された第3期海洋基本計画¹⁾では、その主要施策として「海洋の産業利用の促進」を掲げ、再生可能エネルギーに関して、脱炭素化の大幅な促進に向け推進していく旨の計画が示された。特に洋上風力発電については、浮体式による大規模展開に必要な低コスト化に資する技術開発の必要性が示されている。本方針は、2023年(令和5年4月)に閣議決定された第4期海洋基本計画¹⁾においても引き継がれている。

本稿では、2016～2022年度の7年間実施した当所重点研究における海洋再生可能エネルギー関連研究の実施内容・成果の総括を行う。洋上風力発電に関する技術への取り組みとしては、大型模型を使った水槽試験による性能・安全性評価、数値計算手法の開発、風車ブレードの制御方法による発電量等への影響評価、今後利用が見込まれる合成繊維索を使った係留方法での安全性評価、合成繊維索係留に対する生物付着影響評価等を実施した。基準に関する取り組みとして、合理的建造コスト削減が期待される浮体式洋上風力発電施設の損傷時復原性規則緩和策の適用可否に関する新規評価手法の提案を実施するなど、洋上風力発電を推進するための技術開発、新提案を実施した。波力発電では、スパー型を対象として発電性能向上のための研究開発、日本沿岸に設置した場合の発電量評価等を実施した。海流・潮流発電に関しては、水平式、垂直軸式の両方法の調査研究を実施した。海洋温度差発電においても今後の設置で有望なスパー型を取り上げ、安全性評価のための調査研究を実施した。これらの内容について次項より示す。

2. 洋上風力発電

洋上風力発電は、世界的にも風車の大型化とウィンドファームの大規模化が進んでおり、再生可能エネルギーの中でも発電効率が高い。そのため、政府の掲げるカーボンニュートラルにおける切り札として位置付けられている¹⁾。ここでは、洋上風力発電に関する研究開発の成果を以下に紹介する。

2.1 数値連成解析技術・模型試験に関する研究開発

浮体式洋上風力発電では、性能評価や安全性評価を行う上で、風車—浮体—係留系の連成影響を考慮した数値解析を一般的に時間領域で実施する必要がある。また、当所では、複数の大型試験水槽を有しており、それらを活用した水槽模型試験を実施している。これらの試験結果は数値計算手法、計算結果の精度検証にも用いられる。本項では、特徴的な模型試験、数値計算を示す。

2.1.1 1点係留型浮体式洋上風力発電の水槽試験・数値連成解析

浮体式洋上風力発電の浮体形式には、セミサブ型、スパー型、バージ型等があるが、係留にタレット(回転機構)を組み合わせた新しいコンセプト²⁾について、設計の妥当性検証、数値計算手法の精度検証を目的に水槽試験を実施した。タレットは既に海底石油・天然ガスの生産施設であるFPSO(Floating Production, Storage and Offloading System, 浮体式生産貯蔵積出設備)で使用実績がある。本コンセプトは、タレットによって浮体が風向に追従することで、通常風車で用いられる発電機や増速機を搭載した風車ナセル部の回頭機構を排し、浮体全体を小型軽量化してコスト低減を図るものである。6MWダウンウィンド型風車を搭載し、浮体先頭部にタレットを設置した実機を想定し、図2.1に示す1/30および1/15の大縮尺模型を用いて水槽試験を実施した^{3,4)}。

水槽試験においては、タレットに働く係留索張力と浮体全体に働く流体力により浮体のヒープ運動とピッチ運動が強く連成することを明らかにするとともに、風向と波向にミスアライメント（外力作用方向差）が生じた際の回頭時の挙動を計測し、風向や波向の変化に対する浮体追随性を求めた⁵⁾。

さらに、本コンセプトのような特異な形式に対する数値解析手法を開発した。図 2.2 には縮尺 1/15 模型を用いた水槽試験結果と、機構解析ソフトウェアを用いて風車-浮体-係留系の連成解析を実施した結果を示す⁶⁾。結果として、本項で示すような特殊な構造を有する風車浮体についても水槽試験、数値連成解析評価が可能であることを示した。



図 2.1 1点係留型の浮体式洋上風力発電施設の水槽試験模型（左：縮尺 1/30，右：縮尺 1/15）

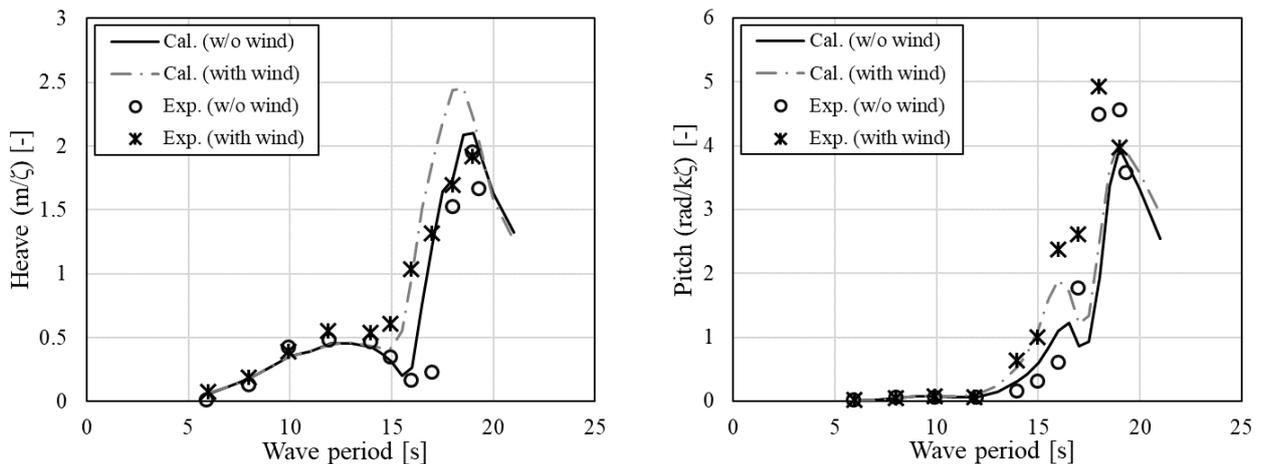


図 2.2 1点係留型の浮体式洋上風力発電施設の数値連成解析結果と水槽試験結果の比較（1/15 縮尺模型，左：ヒープ運動，右：ピッチ運動，定常風，横軸：実機相当規則波）

2.1.2 3翼独立制御風車模型を用いた風洞試験

一般的に風車後流影響は、ロータ直径の 10 倍程度の距離まで存在するとされており、ウィンドファーム設計時は風車間距離を同程度確保することが通常である。他方、浮体式の支持構造を採用した場合、風車浮体の動揺が風下側風車の発電性能に影響をもたらす可能性がある。この影響を風洞試験で評価した。

風洞では、大型風車であることを想定し、実海域の風速勾配（高さ方向風速差）を再現した風環境下で試験を行った。風路内には、1基の風車模型を配置した。この模型は、風車タワー下端に強制動揺装置を内蔵している他、3翼独立ブレードピッチ制御機構が搭載されており、風車の波浪中動揺や制御の影響を考慮することが可能である。図2.3には風速勾配を当所変動風水洞で再現した風速分布と、風上側風車影響を受けた風下側風車位置における風速の標準偏差を示す。上流側風車のロータ回転に伴う後流影響に関して、風上側風車のピッチ運動や風車ブレードピッチ制御による風下側風速への影響は小さく、ウィンドファーム配置でも単独配置の風車と同一の制御アルゴリズムの適用が可能であることを確認した⁷⁾。

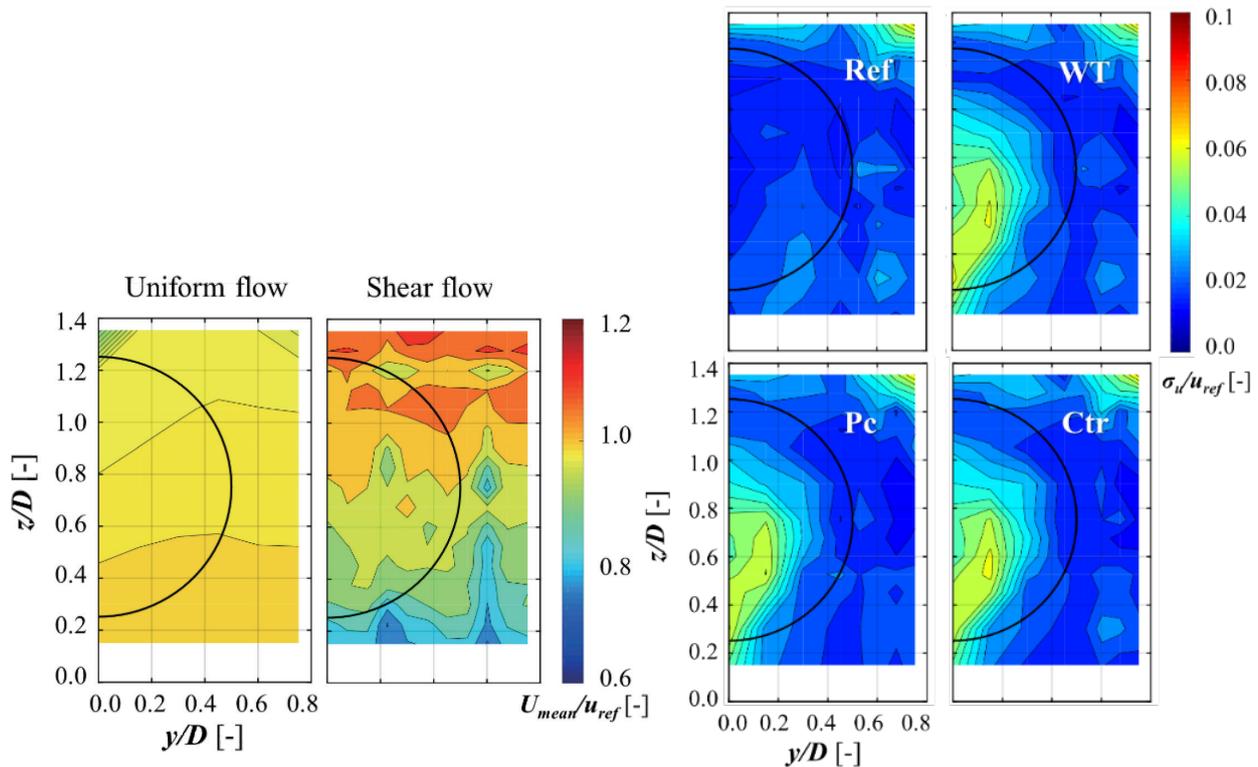


図2.3 3翼独立ブレードピッチ制御風車模型の風洞試験結果

（風下側風車位置（風車直径の2倍距離後方）での左2図は風速分布，右4図は風速標準偏差．図中の黒線円はロータ掃過面．記載用語として，Uniform flow：風速勾配無の均一風速，Shear flow：風速勾配設定風速，Ref：風車無，WT：ブレードピッチ制御無で風上に風車設置，Pc：風車タワー基部を強制ピッチ動揺（ブレードピッチ制御無），Ctr：タワー基部の強制ピッチ動揺に加えブレードピッチ制御実施）

2.2 風車ブレードピッチ制御に関する研究開発

浮体式洋上風力発電においては、陸上型や着床式と同様の風車ブレードピッチ制御を用いるとネガティブ・ダンピングといった浮体運動の増幅現象が生じる場合がある。当所では浮体の波浪中応答の抑制と発電量安定の両立を目的とした制御アルゴリズムを開発してきた。図2.4に15MW風車を搭載したセミサブ型浮体⁸⁾のローハル長さを変えながら、NREL（National Renewable Energy Laboratory，米国再生可能エネルギー研究所）の開発した制御アルゴリズム（ROSCO：The NREL Reference Open Source Controller）⁹⁾のパラメータを様々に変更し、風車発電量を解析した結果を示す¹⁰⁾。浮体仕様、制御パラメータによって発電量の大きく異なる状況が確認できた。

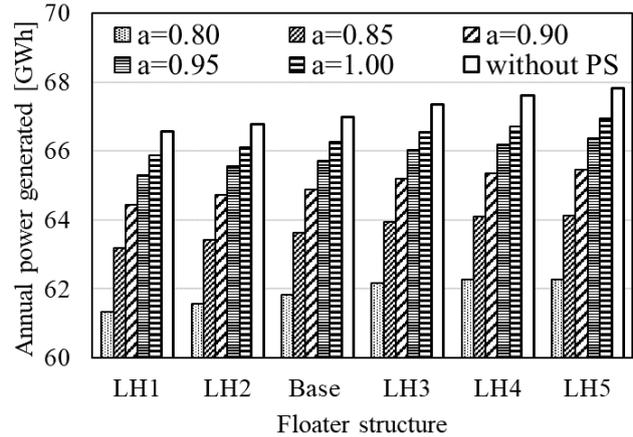
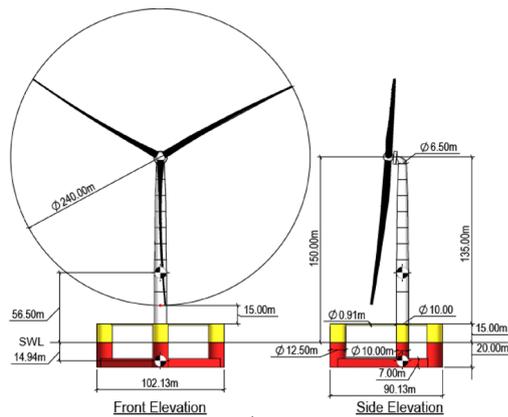


図 2.4 検討対象の浮体式洋上風力発電施設（左）とローラーハル長さ（横軸）とブレードピッチ制御パラメータ（ a ）を変更した場合の風車発電量比較（右）

2.3 合成繊維索係留に関する研究開発

2.3.1 設計上の留意点の抽出

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、当所では調達・運用コストの削減が今後期待できる合成繊維索係留に関する研究開発を実施した。図 2.5 には解析対象に用いたセミサブ型浮体¹¹⁾と水深 64 m で設計した合成繊維索係留のイメージ図を示す。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した¹²⁾。例えば風・波・流れの入射方向の組み合わせについて、同一方向からの入射で最大張力が発生するとは限らないこと等を明らかにした。

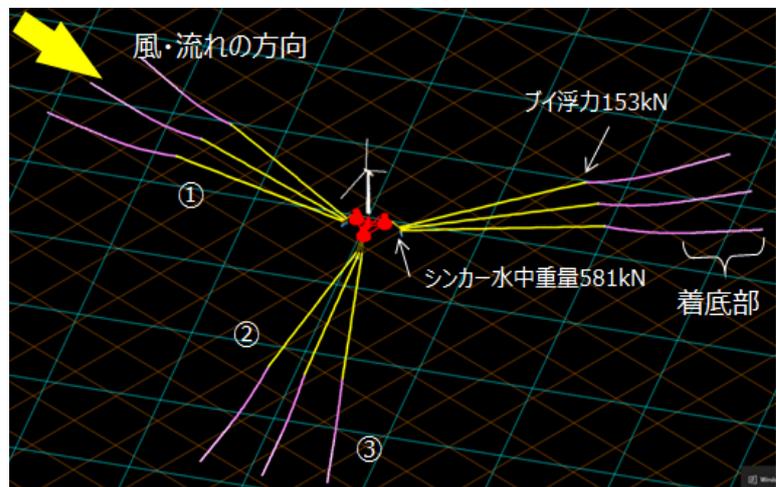
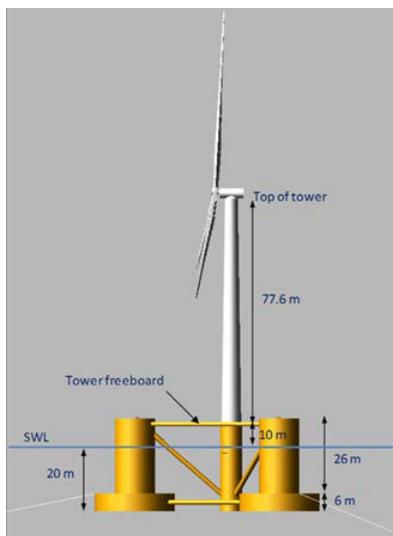


図 2.5 解析対象の実機セミサブ型風力発電施設（左）と検討した係留系仕様（右）

2.3.2 係留合成繊維索に対する生物付着影響の評価

係留索に合成繊維索を用いる場合、i) 生物付着により索の見かけ上の径が増加し、流れに起因する索張力が増加する、ii) 生物付着による重量増加により係留形状が変化し、想定外の箇所が海底と接触する、iii) 生物が索の内部に侵食し、索強度を低下させる、といった影響が考えられる。当所では既存の漁業施設に用いられている合成繊維索に対する生物付着量を調査するとともに、調査結果に基づき試験海域を設定し、実機と同様の構造の合成繊維索試験体を複数実海域に浸漬し、生物付着量と強度影響を評価した。

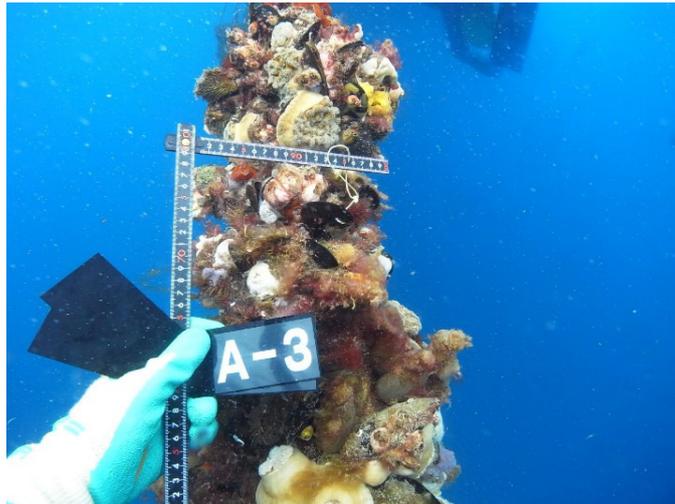


図 2.6 石狩湾での養殖施設係留索への生物付着状況の観察

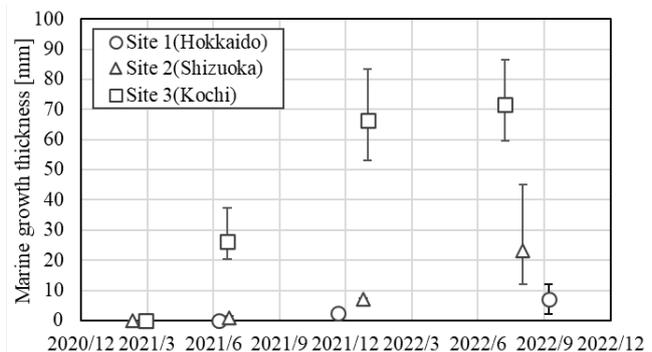
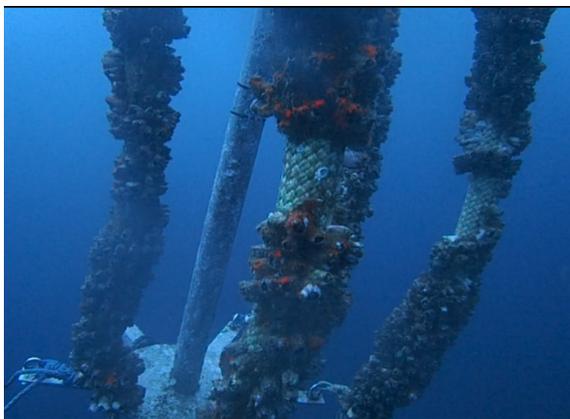


図 2.7 高知県での合成繊維索浸漬試験の様子 (左) と 3 海域 (石狩湾, 沼津市沖, 黒潮町沖) の生物付着厚さの観測結果 (右)

図 2.6 には石狩湾における既存の漁業施設における付着生物の観測結果を示す¹³⁾。また、図 2.7 には高知県における浸漬試験で用いた試験体の様子と、3 海域 (北海道石狩湾, 静岡県沼津市沖, 高知県黒潮町沖) における設置後 1 年から 2 年程度経過した際の観測結果を示す¹²⁾。結果は今後の洋上風力発電施設の係留索安全性検討に役立つ予定である。

2.4 浮体式洋上風力発電施設の損傷時復原性に関する研究開発

浮体式洋上風力発電は石油・天然ガス生産用の海洋構造物とは異なり点検時を除き無人である。また、事故時の環境影響が少ない等の特徴がある。さらに、支持浮体は従来の海洋構造物に対して小型であることが多く、製造性向上等の観点から、損傷時復原性、いわゆる防水区画を不要とする改訂が国際電気標準会議規則 IEC61400-3-2 において実施された。ただ検討の過程で、本改訂において通常であれば必要となる損傷時復原性規定を不要とする条件が明確でなかったため、航行船舶の発電施設への衝突確率、衝突時の支持浮体損傷 (外壁破損) 確率に基づく損傷時復原性規定の適用必要性判定条件の計算手法を提案した¹⁴⁾。本稿刊行時点 (2023 年 12 月) では改訂版の附属書 (Annex S) として発効を待っている状態である。図 2.8 に損傷時復原性規定の適用必要性の判定条件フローを示す。

浮体と船舶の衝突確率については、浮体設置を想定する位置付近の船舶の航跡を AIS (Automatic Identification System, 自動船舶識別装置) データを用いて解析し、浮体と個々の船舶の最接近距離と、浮体設置域周辺の航跡データから求められた浮体-船舶間距離の標準偏差により衝突確率を求める手法を開発した。図 2.9 に浮体式洋上風力発電施設付近を航行する船舶が何らかの原因で衝突に至る状況を想定した航路のばらつきの概念図を示す。

航路位置のばらつき量（距離）は標準的，また推奨としての航路を中心として正規分布で表すことができると仮定した。

船舶の衝突時の浮体の挙動は水槽試験と機構解析による数値計算で評価，検証した。水槽試験では，セミサブ型，スパー型浮体と，浮体と同程度の排水量を有する排水量型船舶との衝突を再現し，衝突時の浮体・船舶の挙動，衝突荷重を計測した。また，浮体係留系への影響（係留張力の時間変動，最大張力）を明らかにした¹⁵⁾。図 2.10 に水槽試験時と機構解析の様子を示す。また，図 2.11 に FEM（Finite Element Method，有限要素法）解析による船舶衝突によるセミサブ型洋上風力発電施設浮体外板の損傷評価の例を示す¹⁴⁾。

これらの解析より，船舶と浮体の衝突確率と衝突による浮体損傷確率を導出した。図 2.12 に長崎県沖での浮体式風力発電施設の設置を想定し，周辺航行船舶との衝突確率を求める場合に用いた AIS データ解析例を示す。

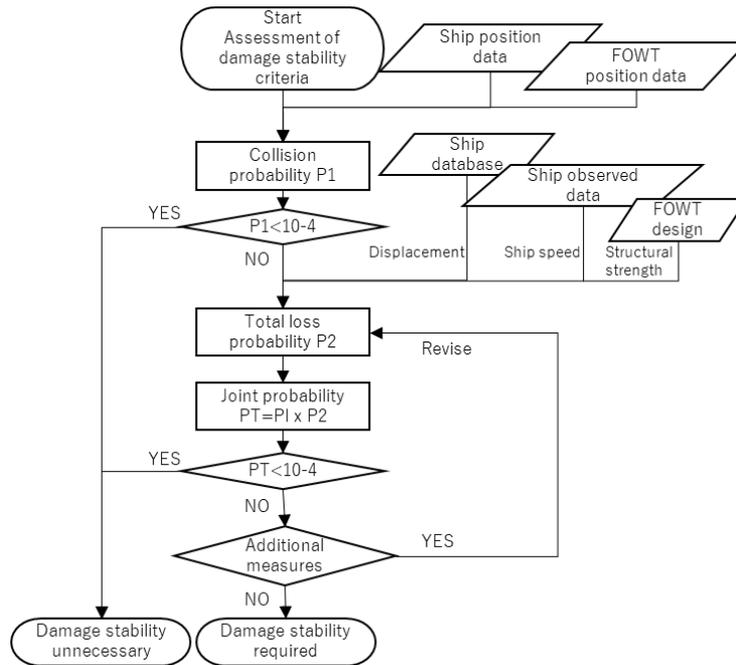


図 2.8 浮体式洋上風力発電施設浮体に対する損傷時復原性規定の適用判定フロー

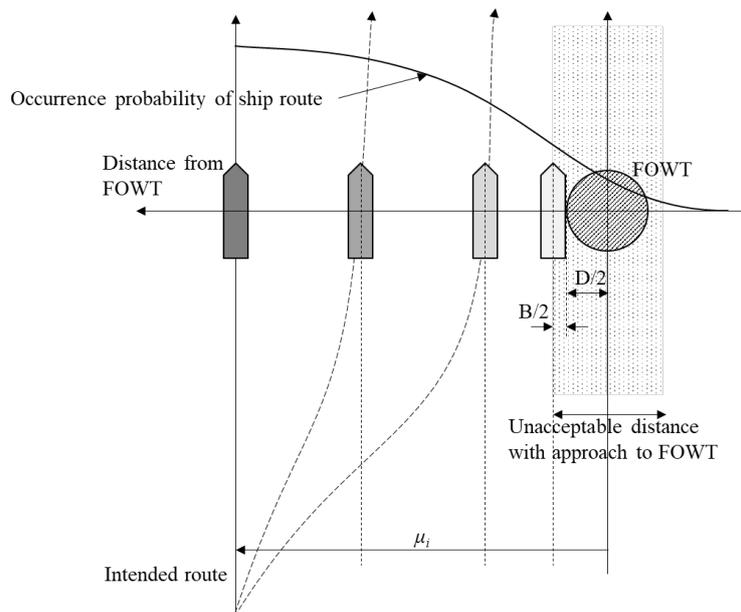


図 2.9 浮体式洋上風力発電施設付近を航行する船舶の航路のばらつきの概念図



図 2.10 水槽試験における船舶と洋上風力発電施設浮体の衝突時の様子と同機構解析

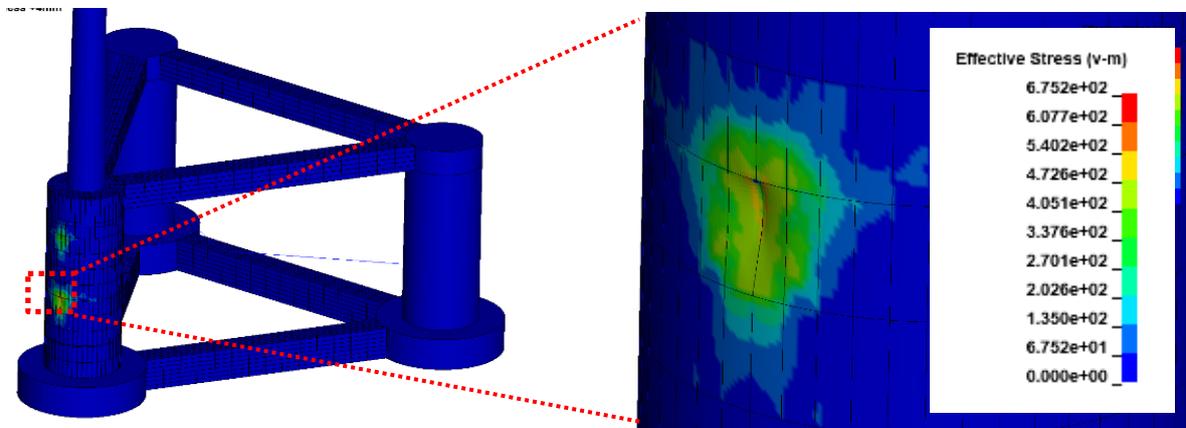


図 2.11 船舶がセミサブ型洋上風力発電施設浮体に衝突した際の FEM 解析に基づく衝突構造損傷評価

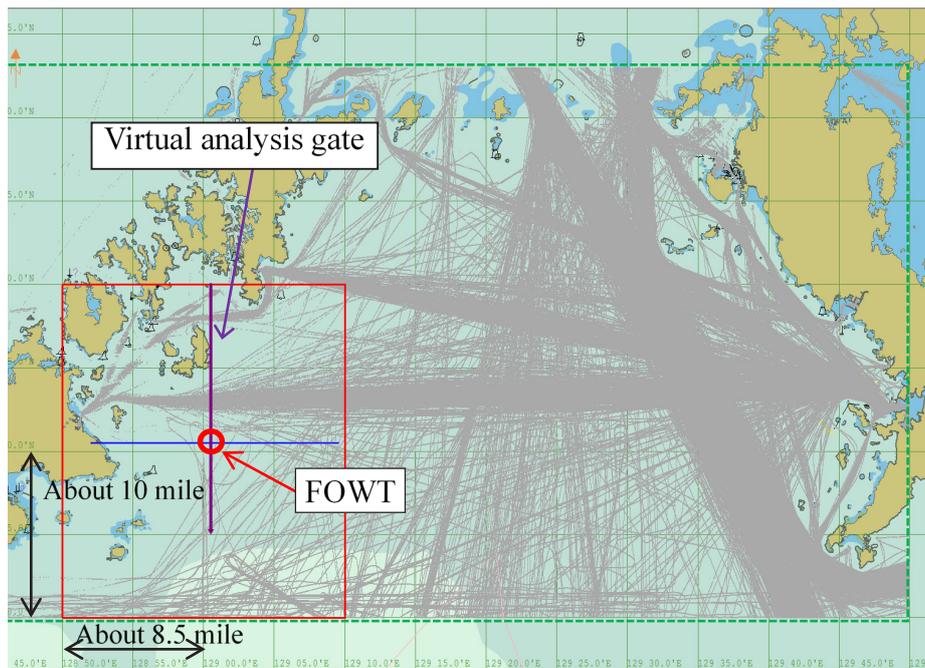


図 2.12 長崎県沖の AIS データ解析の例

(赤丸 (FOWT) が浮体式洋上風力発電施設設置想定場所, 赤四角枠内の AIS 船舶航行データ (灰色線) を解析)

2.5 浮体式風力発電の設置・維持管理に関する研究

2.5.1 CTVに関する研究

我が国の洋上風力発電事業を促進する上で、運用・維持管理コストを低減することが重要である。運用・維持管理コストの約半分は船舶（クレーン作業船等）に関連する経費であり、中でも洋上風力発電施設に向かうためのCTV（Crew Transfer Vessel, 洋上風力発電アクセス船）に関する経費の占める割合は大きい¹⁶⁾。作業現場では通常、船首部を風車タワーに強く押し付けながら作業員の乗り移りが行われているが、波浪中で動揺するCTVから風車タワーに作業員が乗り移ることは決して容易ではない。船首部フェンダーと風車タワー間に生じる摩擦がCTVの波浪中運動に与える影響については、これまであまり検討が行われてこなかったため、安全または稼働性評価という視点から、この影響について明らかにしておく必要がある。そこで当所ではCTVから風車タワーへの乗り移り評価に関する研究を行った。



図 2.13 研究対象 CTV (上) と風車タワーに対する CTV 押し付け荷重計測時の水槽試験状況 (下)

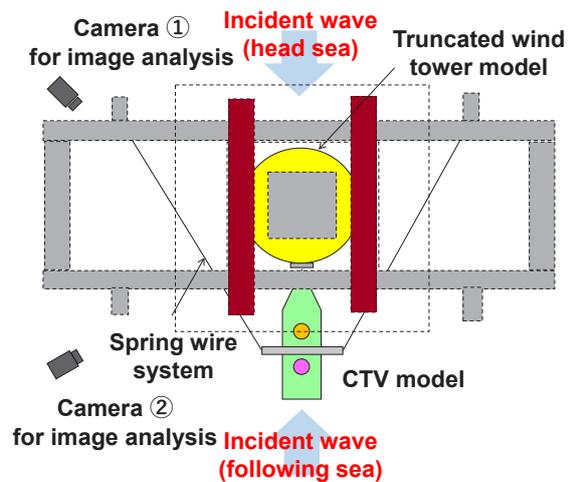


図 2.14 水槽試験の実施状態 (CTV と風車タワーの関係、拘束状況等)

本研究では想定 CTV として高速型双胴船（カタマラン型）を対象とした。図 2.13 は試験で使用した模型船と水槽試験の状況写真、図 2.14 は水槽試験の実施状態図である。模型スケールは 1/15 とした。船首部をタワー側面に固定した接触板（検力計付フェンダー）に押し付けた状態となるようにワイヤーとばねを用いて 2 方向に展張するよう係船した。また、船首部と接触板の表面には接触部材（静止摩擦係数：0.75）を装着した。規則波中試験結果を示す。

図 2.15 上図は、波高 (H) が 5.0cm (実海象 0.75m)、CTV ボラード推力約 16N (実機 $5.3 \times 10^4 \text{N}$) で押し付けた場合の船首乗り移り点付近における上下運動の時系列結果である。左図は波周期 (T) が 2.07sec (実海象 8.07sec)、右図は 0.64sec (実海象 2.45sec) である。波周期が 2.07sec の場合は、船首部は上下運動を行うが、調和振動の山と谷付近が潰れたような波形になっている。一方、波周期が 0.64sec の場合は船首部の上下運動は押し付け力が作用しているために Stick (完全固着) されている。これらはすべて、船首部とフェンダーの間に作用する摩擦力が影響しているものと考えられる。図 2.15 下図は船首部上下運動と摩擦係数（船首部に作用する上下力と押し付け力の比）の関係を示したものである。波周期が 2.07sec の場合は、船首部が上下運動する際には摩擦係数が一定となる。一方で、船首部が完全固着される状態では摩擦係数が大きく変化している。

計測された時系列データに基づき、CTV の船首部が風車タワーの乗り移り部に対して、Slip (滑る) か、Stick するかを整理したものを図 2.16 に示す。同条件下で数回の試験を行い、再現性が確認できなかったものについては判別困難 (図中の△) と評価した。波周期 1.0sec (実海象 3.8sec) 付近に Stick/Slip 境界が存在しており、波高に応じて境界の周期も変化している。また、図中には別途実施した数値計算による推定結果についても実線で併

記しているが、水槽試験で得られた傾向を適切に再現していることが分かる。この計算法を応用することで、CTVから風車タワーへの乗り移りに大きな障壁となる Stick/Slip 現象の規則波中発生予測が可能となった¹⁷⁾。

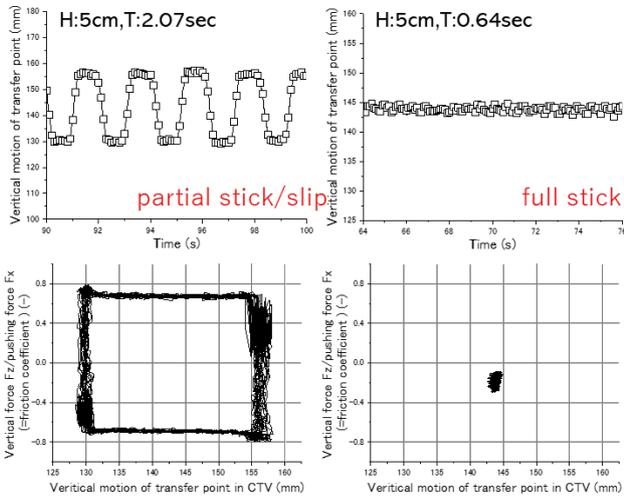


図 2.15 船首乗り移り部に発生する Stick/Slip 現象 (水槽試験結果)

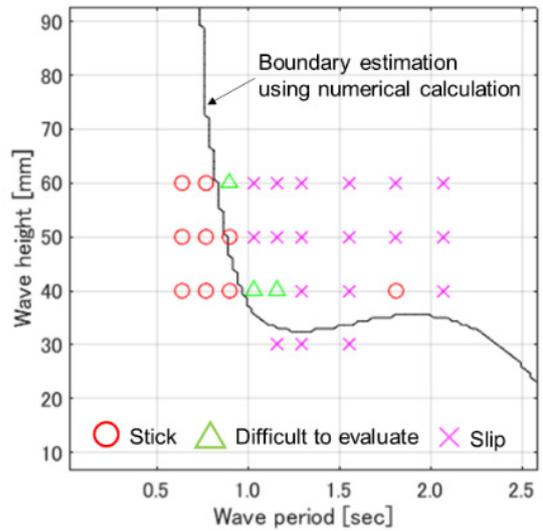


図 2.16 Stick/Slip 境界 (水槽試験結果と計算結果の比較)

2.5.2 SEP 船に関する研究

洋上風力発電施設の施工には、大型の SEP 船 (Self-Elevating Platform, 自己昇降式作業台船) が使用される。この作業船は通常 4 本の脚部を有したクレーン付きの作業台船であり、各脚部を海底に着底させ、台船部分全体を持ち上げることによって安定した吊作業を行う。元々海洋開発分野で使用されている船舶であるが、浮体式洋上風力発電の作業現場では、浮体支持構造に風車を据え付ける作業等に使用される。風車の大型化に伴い、より高い揚程が求められるため、脚部の大型化が見られる。そのため、脚部に作用する各種の荷重評価が重要となっている。当所では SEP 船に作用する荷重評価に着手しており、主要荷重の一つである風荷重評価および流場計測試験を実施した。

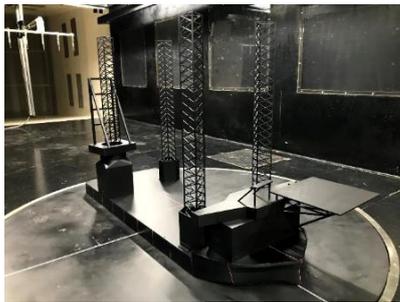


図 2.17 SEP 船風洞試験の様子

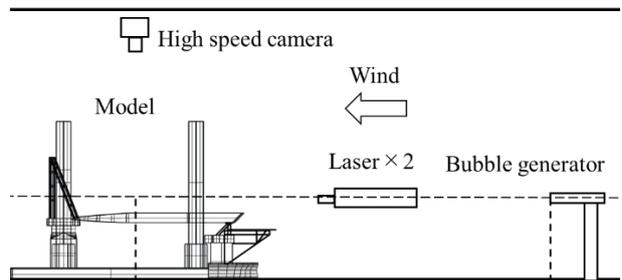


図 2.18 風洞試験の実施状態 (側面)

12MW 級の風車が搭載可能な SEP 船を対象とし、縮尺 1/100 模型で風洞試験を実施した。図 2.17 には風洞試験の様子、図 2.18 には側面から見た模型配置の概略図を示す。本模型の脚部を交換することにより、脚部昇降途中の異なる状況を再現した。また、各脚部の基部と船体底面に検力計を設置し、風荷重を脚部毎に個別計測した。さらに、PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速測定法) 計測を実施し、脚部まわりの流場を計測した。

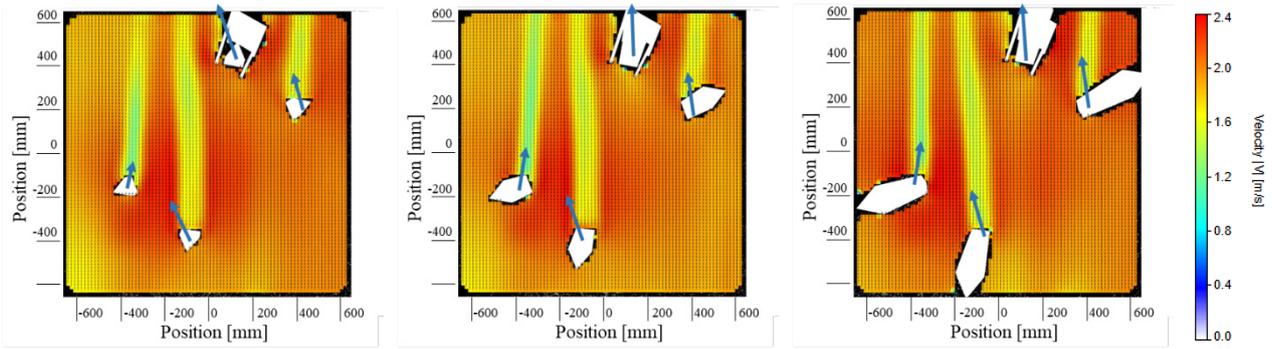


図 2.19 風向 40deg のときの脚部まわりの流場と脚部に作用する荷重ベクトル
(左から模型スケール脚部長 50cm, 70cm, 90cm)

図 2.19 には, PIV 計測による流場解析結果に正規化した脚部作用荷重ベクトルを重ねたものを示す. これより, 脚部の長さによらず作用荷重正規化値が概ね同一であること, 脚部まわりの流場にもほぼ影響が見られないことを確認した. 他方で, 今回想定した脚部がトラス構造の三角柱であったため, 脚部に作用する荷重は風速方向のみではなく, 風速に対して直交する成分も含まれていることも明らかになった. なお, 図 2.19 で脚部長が長い場合では計測画角の関係でより脚部が長く (図中白抜) 写り込んでいることを補足する.

2.5.3 浮体式風力発電の施工日数に関する検討

浮体式風力発電の経済性向上のためには浮体施工コストの低減も重要である. 当所では, これまで施工された浮体式風力発電の係留系に関する施工工程について, 日欧における既存の浮体式洋上風力発電施設および洋上変電所の実績値 (Kincardine¹⁸, Hywind Scotland¹⁹, 福島沖実証²⁰等) からその差を分析し, 施工の中で短縮すべき工程を抽出した²¹. 解析例を図 2.20, 2.21 に示す. 欧州に比べ施工工程の大きく異なる実態を明らかにするとともに, 経済性向上のために取るべき方策を提示した.

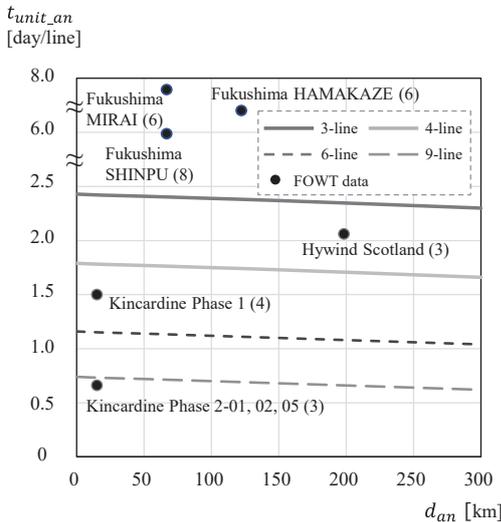


図 2.20 アンカリング拠点港からの距離 (d_{an}) と係留 1 本あたりのチェーンとアンカーの設置時間と把駐力確認作業時間の合計 (t_{unit_an}) の関係

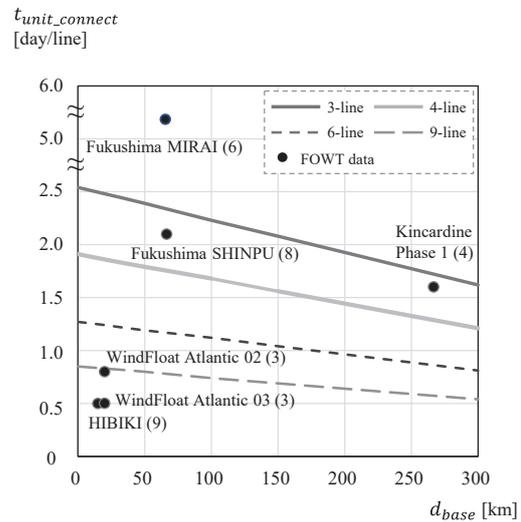


図 2.21 基地港からの距離 (d_{base}) と係留 1 本あたりの係留接続時間 ($t_{unit_connect}$) との関係

2.6 浮体式風力発電のまとめ

第1期中長期計画において、風車—浮体—係留系の連成解析、ブレードピッチ制御、合成繊維索を用いた係留系等について研究開発を行ってきた。これらは主に1基の浮体式洋上風力発電施設を対象としたものだったが、今後大規模ウィンドファームを対象とした浮体式風力発電の実用化に向けた研究に移行していく計画である。

3. 波力発電

波力発電施設は海洋波から波エネルギーを取り出す装置であり、Wave Energy Converter の頭文字を取り WEC と呼ばれる。WEC は波エネルギーを他の力学的エネルギーに変換する波エネルギー一次変換装置とこれを電力等の利用しやすいエネルギーに変換する二次変換装置 (PTO: Power Take-Off System) を持ち、これらの組合せで多種多様な形式がありえる^{22,23)}。WEC に関する技術成熟度は、各国の事業毎に様々であるが²⁴⁾、トップランナーは商用化に向けた実証事業を進めている。当所は、WEC 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 WEC (PAWEC: Point Absorber Type WEC) の研究開発を行っており、本章はこれまでの研究開発成果を概説する。

3.1 対象 PAWEC

PAWEC の中でも可動浮体と基部構造物の接続方法でいくつかの形式が考案されているが、当所では高い波エネルギー吸収が期待できる図 3.1 に示すような一次変換装置として中空円筒体の可動浮体(図中の Float)を持ち、基部構造物としてスパー(同 Spar)を持った着床式および浮体式の PAWEC を研究対象としてきた。

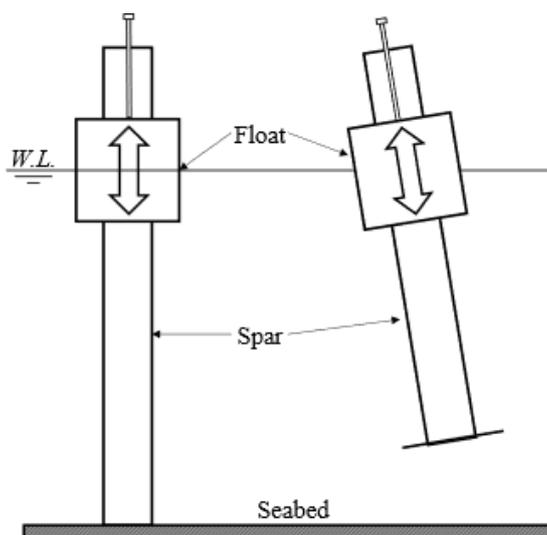


図 3.1 研究対象とした PAWEC の概念図 (左: 着床式、右: 浮体式)

3.2 着床式 PAWEC に関する研究開発

3.2.1 フィード・フォワード同調制御技術を用いたリニア式波力発電に関する研究開発

当所は重点研究とも位置づけながら 2014 年 12 月から 2018 年 3 月まで実施された、NEDO「海洋エネルギー技術研究開発/次世代海洋エネルギー発電技術研究開発/リニア式波力発電」²⁵⁾に参画した。この事業では、A) 次世代 PTO システムの開発、B) 波力発電アレイ制御技術の開発、C) 次世代波力発電システムの発電コスト評価の 3 つの研究開発に取り組んだ。PAWEC に入射する波の予測アルゴリズムおよび波の予測に基づくフィード・フォワード同調制御技術を開発し、この制御をリニア式 PTO に適用することで高い発電性能が期待できることを大型模型(直径 1m, 深さ 1.28m, 排水質量 348kg)による水槽試験で検証した。また、図 3.2 に示すように複数浮体

が作る波の干渉影響も考慮しながら波の吸収エネルギーを最大化させる同調制御の有効性確認試験を実施した。さらに、緊張係留された PAWEC の安全性評価を水槽試験で検証した。



図 3.2 着床式 PAWEC のアレイ波干渉影響を考慮した同調制御の有効性確認試験 (左 : 2 浮体, 右 : 3 浮体)

3.2.2 永久磁石式横磁束形リニア同期発電機を用いた波力発電に関する研究開発

実海域実証試験規模の PAWEC にも搭載可能な 1m 程度の可動域を持つ、強力かつ堅牢な永久磁石式横磁束形リニア同期発電機を開発し、図 3.3 のようにリニア式 PTO として前項と同じ大型 PAWEC 模型に組み込み水槽試験を行った²⁶⁾。この試験により、開発したリニア式 PTO の基本性能を確認すると共に、リニア PTO の発電時における電圧と電流ベクトルの挙動を解明した。



図 3.3 リニア式 PTO を組み込んだ PAWEC 水槽試験

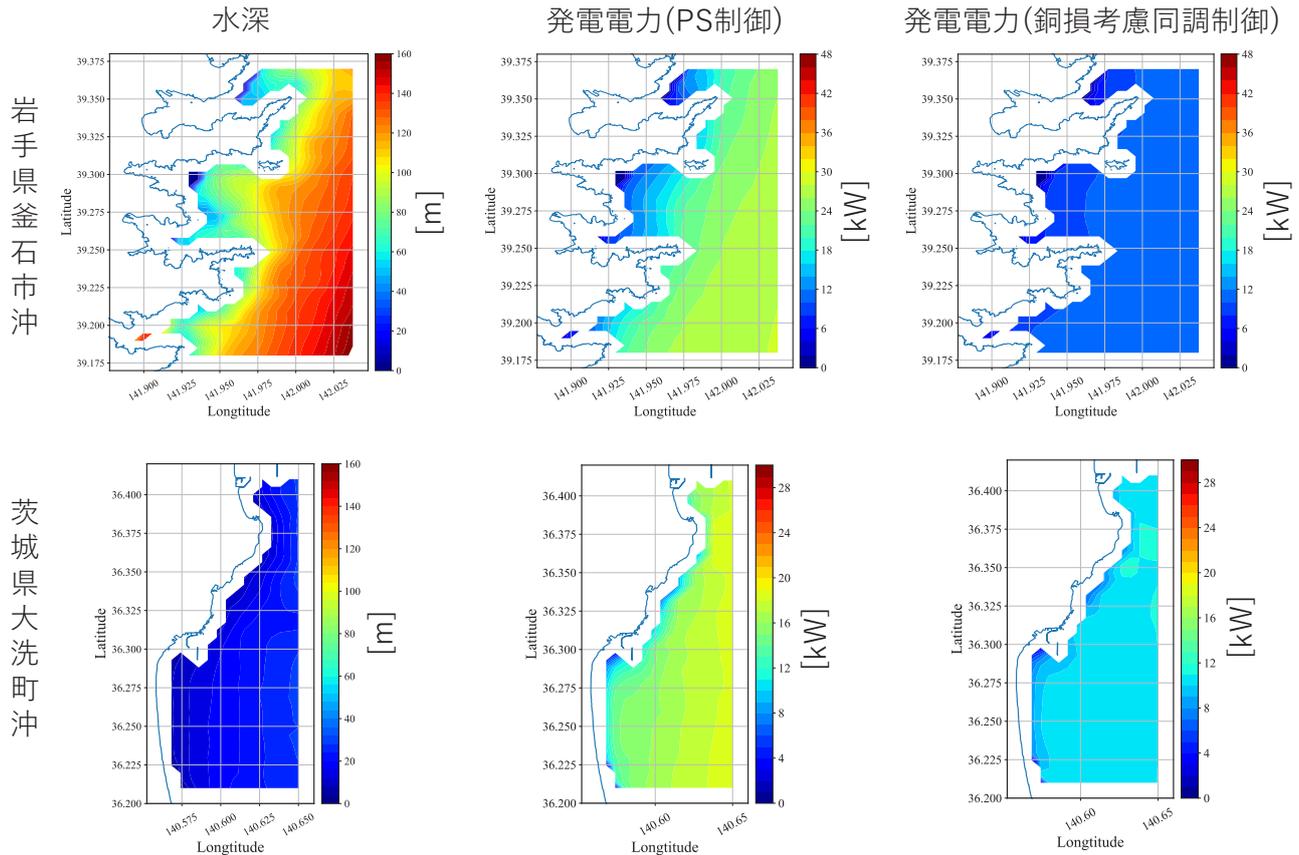


図 3.4 PS 制御の有用性検証のための PAWEC 発電性能の数値計算結果

3.2.3 PS 制御を用いた波力発電に関する研究開発

図 3.1 に示した PAWEC には可動浮体の変位量に上下限の制約がある．また、PTO で生成される制御力にも一般的に上下限、変化率の制約がある．前項で示した波の予測に基づくフィード・フォワード同調制御では制約条件を考慮し、かつ発電電力を最大化することが可能であるが、PAWEC に入射する将来の波を予測する必要がある．一方、通常波高や周期が同程度の海象が数十分から数時間継続し、確率的に定常状態と見なせることが多い．そこで、確率的に定常状態と見なせる場合に可動浮体の変位制約条件を考慮し、かつ、平均発電電力を最大化する制御法（PS (Power Spectrum) 制御）を開発した^{27,28)}．PS 制御の有用性を確認するため、岩手県釜石市沖および茨城県大洗町沖の 2 海域を対象に発電電力評価を行った．発電装置として直径 10m、深さ 2.4m の円筒形可動浮体を想定した．結果を図 3.4 に示す．この評価では、海域の水深を考慮した波スペクトルを用いることでより現実に即した評価とした．PS 制御法を用いることで、変位の制約条件を考慮できない従来の制御法、例えば ACL 制御 (Approximate Complex-Conjugate Control with Considering Copper Loss, 銅損考慮出力最大制御) よりも発電性能が向上していることを確認した．なお、PS 制御では船体応答の短期予測の考え方を援用し、変位の制約条件を満たした最適制御ゲインを決定した．周波数領域の計算のため計算時間が短く、波力発電装置の試設計時に有用である．

3.2.4 ベイズ最適化手法を用いた波力発電に関する研究開発

これまでに開発した波の予測に基づくフィード・フォワード同調制御や PS 制御には精度の高い PAWEC の制御モデルが不可欠であり、モデル化誤差が含まれる場合には発電電力の低下が生じる．そこで、可動浮体の減衰力係数にモデル化誤差がある規則波条件下において、PTO に適用する制御ゲインの最適化を行い、モデル化誤差が制御ゲインと平均発電電力に与える影響を調査し、ベイズ最適化により制御ゲインを数値実験的に最適化する方法を開発した²⁹⁾．さらに、この手法を不規則波中で適用し、図 3.5 および図 3.6 に示すように PS 制御と概ね発

電性能が一致することを確認した²⁸⁾。このとき、発電装置として直径 0.35m、深さ 0.5m の円筒形可動浮体（実機の 1/20 スケール）を対象とした。

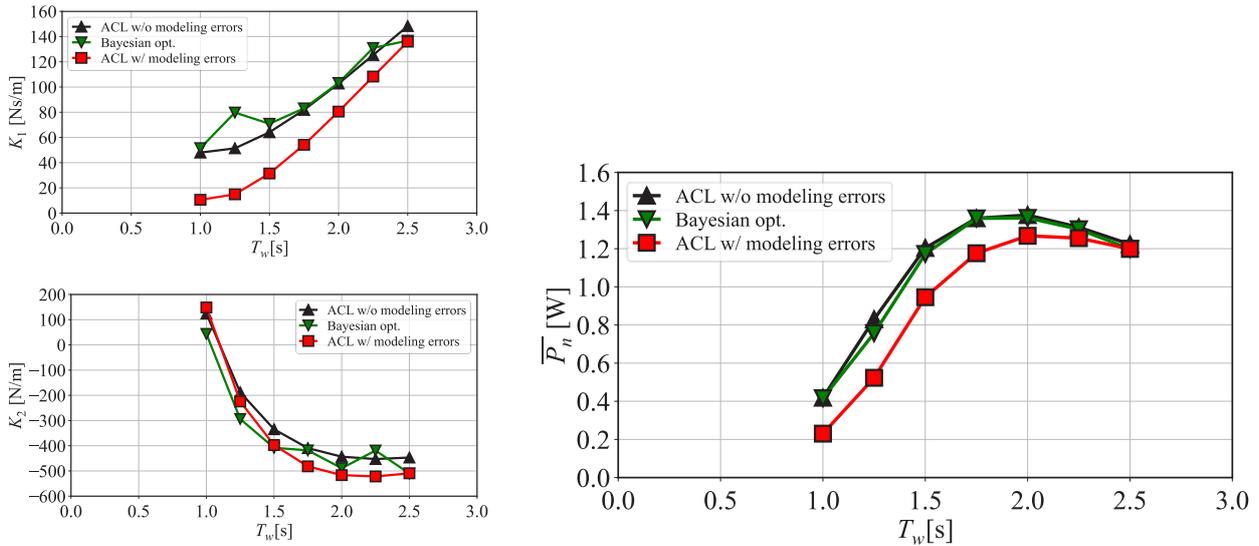


図 3.5 着床式 PAWEC を対象とした制御ゲインの比較（左）、規則波中の縮尺モデル平均発電電力の比較（右）（波高 0.1m, 横軸は波周期, ACL : 銅損考慮出力最大制御, Bayesian opt. : ベイズ最適化制御）

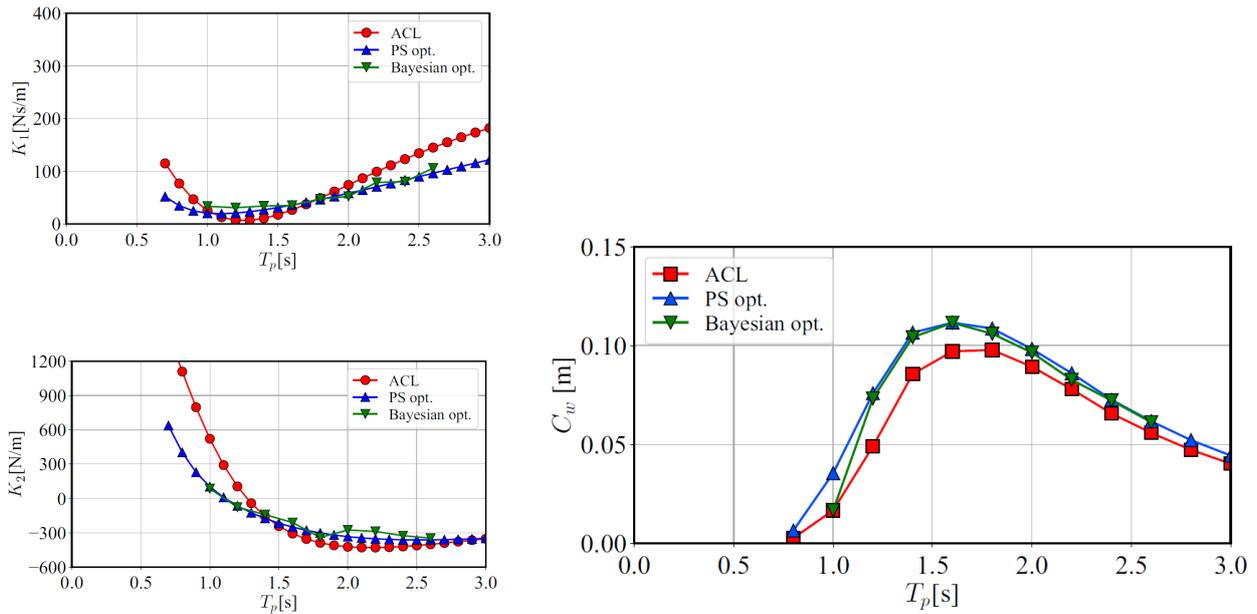


図 3.6 着床式 PAWEC を対象とした制御ゲインの比較（左）、不規則波中の縮尺モデル平均発電電力（エネルギー吸収幅）の比較（右）（JONSWAP 型不規則波, 有義波高 0.1m, 横軸はピーク波周期, ACL : 銅損考慮出力最大制御, PS opt. : PS 制御, Bayesian opt. : ベイズ最適化制御）

3.3 浮体式 PAWEC に関する研究開発

波条件の良い沖合にも展開できる浮体式 PAWEC の研究開発として、浮体式 PAWEC が持つ運動拘束³⁰⁾も考慮して運動方程式を立式し、これに基づく非線形状態方程式を導出すると共に、可動浮体の変位と制御力に対する制約条件を考慮しながら発電電力を最大化する非線形モデル予測制御（NMPC: Nonlinear Model Predictive Control）を浮体式 PAWEC に適用する研究開発^{31,32,33)}を行った。水槽模型に組み込み可能な小型 PTO の陸上試験システムを開発し、1 自由度系（着床式）で NMPC の実時間制御の検証を行った上で、最終目的である多自由度系（浮体式）PAWEC を対象に研究開発を行った。図 3.7 に代表例として不規則波中での水槽試験結果と数値計算結果の比較を

示す。可動浮体の形状は、直径0.4m、深さ0.4mの円筒形である。結果として、実時間でPTOを制御可能なNMPCの開発には成功した。数値計算法については、定量的評価について課題は残したものの概ね定性的な評価を行うことができた。

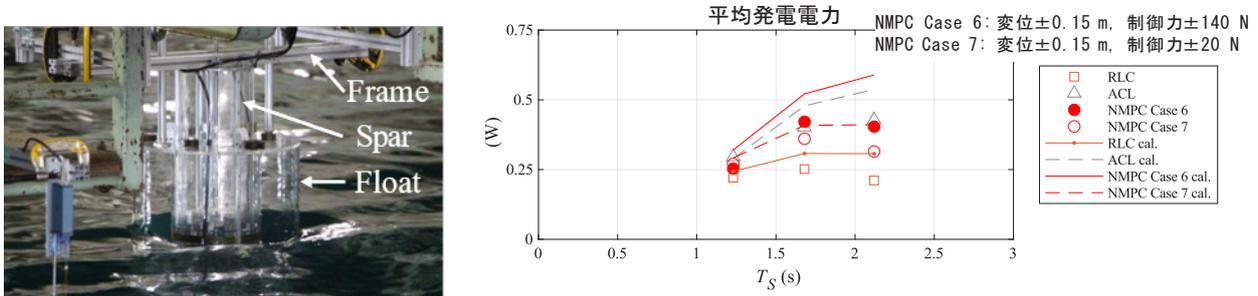


図 3.7 1 自由度系 PAWEC での NMPC の実時間制御検証のための水槽試験 (左), 不規則波中の水槽試験での平均発電電力に関する試験結果と数値計算結果の比較 (右) (JONSWAP 型不規則波, 有義波高 0.1m, 横軸は有義波周期, RLC: 抵抗制御, ACL: 銅損考慮出力最大制御, NMPC: 非線形モデル予測制御)

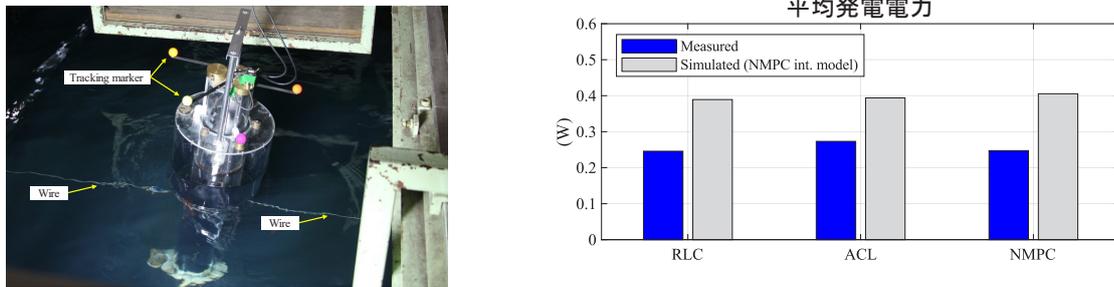


図 3.8 浮体式 PAWEC での NMPC の実時間制御検証のための水槽試験 (左), 不規則波中の水槽試験での平均発電電力に関する試験結果と数値計算結果の比較 (右) (JONSWAP 型不規則波, 有義波高 0.1m, 有義波周期 1.68s, RLC: 抵抗制御, ACL: 銅損考慮出力最大制御, NMPC: 非線形モデル予測制御)

3.4 波力発電のまとめ

第1期中長期計画中に行った波力発電の研究開発を概説した。着床式 PAWEC に関する研究開発では、外部機関との大型模型を用いた研究開発に取り組み、開発された新技術等の実験的検証を担った。また、これらの研究開発結果を踏まえた独自の制御法の開発とその有用性の確認も進めた。浮体式 PAWEC の研究開発では、発電性能の向上を目指し、可動浮体に非線形モデル予測制御を適用した場合の実時間制御の検証に取り組んだ。当所では主に着床式および浮体式 PAWEC の研究開発に取り組んできたが、ここで開発された要素技術は他の形式の WEC に対しても有効であり、これから展開が期待される実海域での WEC 活用時に技術的貢献が可能である。

4. 海流・潮流発電

潮流・海流発電は、水平方向の流れを利用して水車を回し、流体の運動エネルギーをタービンの回転運動に変換して発電を行う。潮流は、潮の干満によって規則的に流れるため、発電に利用するにあたって予測がしやすく、信頼性の高いエネルギーである。他方海流は、相対的に流れが強く、時間変化も少ないため、より安定したエネルギーの確保が期待できるが、流れの強い地点は陸地から離れていることが多いため、送電距離など、実用化に向けての課題も多い。流れが発生する仕組みによって呼称を区別しているが、発電施設そのものの機構は同一の概念が利用できる。この発電施設は、表 4.1 に示すように支持構造物、タービン (ロータ) 回転軸方向によって

分類が可能であるが、当所では、水中浮遊式水平軸型発電施設と浮体式垂直軸型発電施設に関する主として安全性評価の観点からの研究開発を実施した。図 4.1 にこれらの概要図を示す。水中浮遊式水平軸型発電施設は、浮遊バランスを取るために水平方向に接続された 2 基のタービンを用いて発電をする形式であり、係留安全性（冗長性）確保のため 2 本以上の係留索によって位置保持を行うことが想定される。他方、浮体式垂直軸型発電施設は、1 式の垂直軸型タービンを搭載した形式を検討対象とした。

表 4.1 海流・潮流発電施設の種類

分類手法	主な種類
支持構造物による分類	着床式 : 施設が海底面に着底する形式 浮体式 : 水面上に一部が露出する形式 水中浮遊式 : 水面下に全体が没水する形式
発電ロータ回転軸方向による分類	水平軸型 : ロータ回転軸が水平な形式 垂直軸型 : ロータ回転軸が垂直な形式

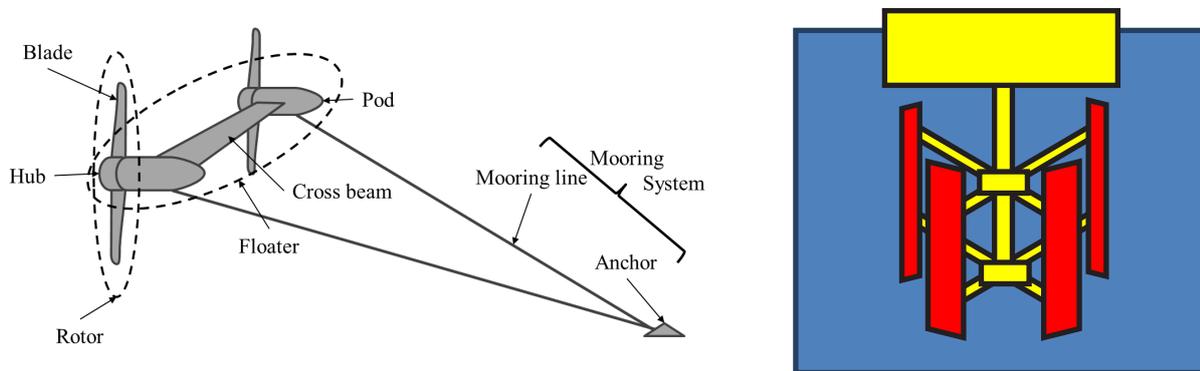


図 4.1 水中浮遊式水平軸型潮流・海流発電施設構成要素（左）と浮体式垂直軸型同発電施設イメージ（右）

4.1 水中浮遊型水平軸型潮流・海流発電に関する研究開発

水中浮遊式水平軸型発電施設を対象として、様々な設計荷重条件が作用した場合の応答把握を水槽試験によって行った。正常運転時を対象とした定常的な応答計測に加え、異常発生状態として 2 本係留のうち 1 本が破断した場合を想定した過渡応答状況の計測も実施した。使用した水槽試験模型（左右ロータ軸間距離 1.08m, ロータ直径 0.9m, 1/50 縮尺想定）と試験の様子を図 4.2 に示す。この水槽試験によって、異常発生時に、2 対のタービンをつなぐクロスビームおよび係留索に対する非常に大きな荷重の作用を明らかにした³⁴⁾。



図 4.2 水中浮遊式水平軸型発電施設の水槽試験用模型（左）と水槽試験の様子（右）

水槽試験に合わせて、数値解析も実施した。ロータの応答を翼素運動量理論、CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学) の両手法を用いて検証し、その結果を元に機構解析を用いて過渡応答を再現した。なお機構解析

とは、対象を複数の剛体やジョイントによって構成し、各接続部を状態に応じた拘束条件を適用することで複合剛体挙動をモデル化する手法である。図4.3に検討結果としてのロータブレードのスラスト係数と機構解析イメージおよび座標系を示す。

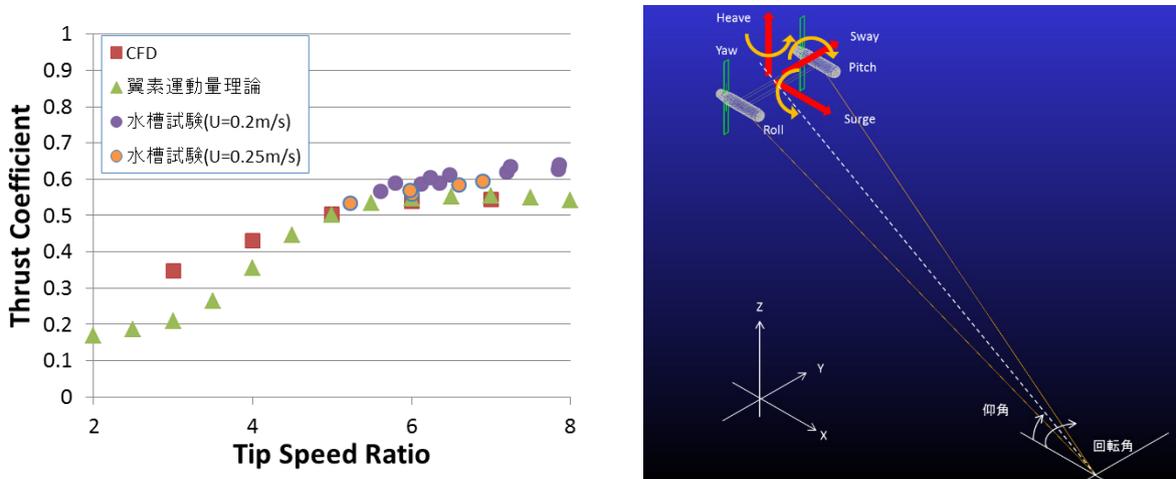


図 4.3 ロータブレードのスラスト係数（左）（横軸は翼端速度と風速の比）と機構解析イメージおよび座標系（右）

4.2 浮体式垂直軸型潮流・海流発電に関する研究開発

浮体式垂直軸型施設を対象として、様々な設計荷重条件が作用した場合の応答把握を水槽試験で行った。先に示した水中浮遊式と同様に、複数の設計荷重ケースを想定した水槽試験を実施し、基礎的な水槽試験実施手法を確立した。図4.4に使用した模型（浮体全長2.9m、ロータ直径0.6m、ロータ高さ0.6m、1/20縮尺想定）と試験の様子を示す。水槽試験では、故障状態の模擬として、回転が急停止した場合や、4枚のブレードのうち1枚が欠損した状態を再現し、特にブレードが欠損した場合は、定常状態と比較してスラストおよび横力の変動量が増加することを確認した。



図 4.4 浮体式垂直軸型発電施設の水槽試験用模型（左）と試験の様子（右）

水槽試験に対応する数値解析も実施した。水中浮遊式水平軸型発電施設と同じく、ロータの応答を翼素運動量理論、およびCFDによって計算し、その結果を利用して機構解析を実施した。図4.5に示すのは、定常運転時の応答の平均値を手法ごとに比較した結果であり、本手法により概ね妥当な結果が得られることを確認した。

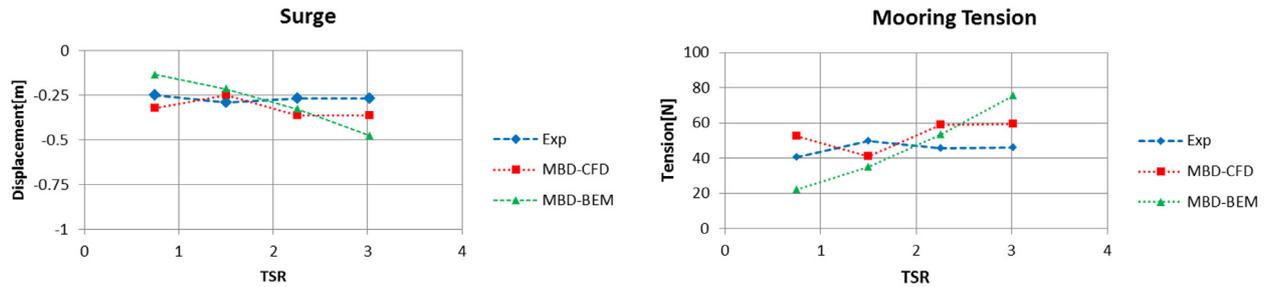


図 4.5 浮体式垂直軸型発電施設の浮体変位（左）と係留張力（右）の水槽試験結果と数値解析結果の比較（横軸は Tip Speed Ratio（翼端速度と流速の比），Exp：模型試験，MBD-CFD：CFD-機構解析，MBD-BEM：翼素運動量理論-機構解析）

4.3 潮流・海流発電のまとめ

潮流・海流発電施設の安全性評価手法の検討を目的として，水中浮遊式水平軸型と浮体式垂直軸型に関する水槽試験を実施するとともに，機構解析手法に基づく数値解析を実施した．代表的な 2 種の浮体式潮流・海流発電施設を取り上げたが，水槽試験，数値解析による安全性評価が十分可能であることを示した．また，最終的には浮体式潮流・海流発電施設安全ガイドライン案として取りまとめた．

5. 海洋温度差発電

海洋温度差発電（OTEC: Ocean Thermal Energy Converter）は，海面近くの温かい海水と深海域の冷たい海水の温度差を利用し，例えばアンモニア等の作動流体を蒸発させ，タービンと発電機を回転させることで発電を行う．近い将来の実証事業や商用化を円滑に推進することを目的として，既存事業の調査・整理，類似する施設の基準の調査，OTEC の海外基準の調査を行い，それに基づいて浮体式海洋温度差発電施設安全ガイドライン案を作成した．

浮体式海洋温度差発電施設は，発電施設浮体，浮体の係留システム，深海の低温海水の取水管および浮体近傍に設置される温水取水管・配水管で構成される．安全性評価という観点から主体となる施設浮体と低温取水管の挙動に着目することとし，波・潮流中の取水管や係留システムの影響を含んだ施設浮体挙動評価および取水管に作用する荷重評価試験等を実施した³⁵⁾．施設浮体としては，今後建造時に有力な候補になると考えられるスパー型を対象とした．

5.1 対象海洋温度差発電施設浮体と水槽試験

試験で使用した模型を図 5.1 に示す．主としてスパー型浮体，冷水取水管模型，取水ポンプからなる．直径 35m 浮体を想定し，試験海象条件を考慮した結果として 1/100 模型を製作した．取水状態を再現した取水管内部の流動水影響も調査することから，取水管上端はホースに接続し，台車上に設置した取水ポンプで所定の水を吸い上げた．

図 5.2 は，不規則波中（有義波高 0.1m，有義波周期 1.4s，実機の場合では有義波高 10m，有義波周期 14s）の取水管取り付け部における y 軸（浮体縦運動軸）モーメントの PSD（Power Spectral Density，パワースペクトル密度）である．潮流無しかつ取水無しの条件に対して，潮流かつ取水有りの条件では振幅が小さくなっており，潮流有るかつ取水無しの条件でさらに振幅が小さくなっている．浮体式海洋温度差発電施設の安全性評価を精緻に行うためには，波，潮流，取水の有無を考慮する必要があることを示した．

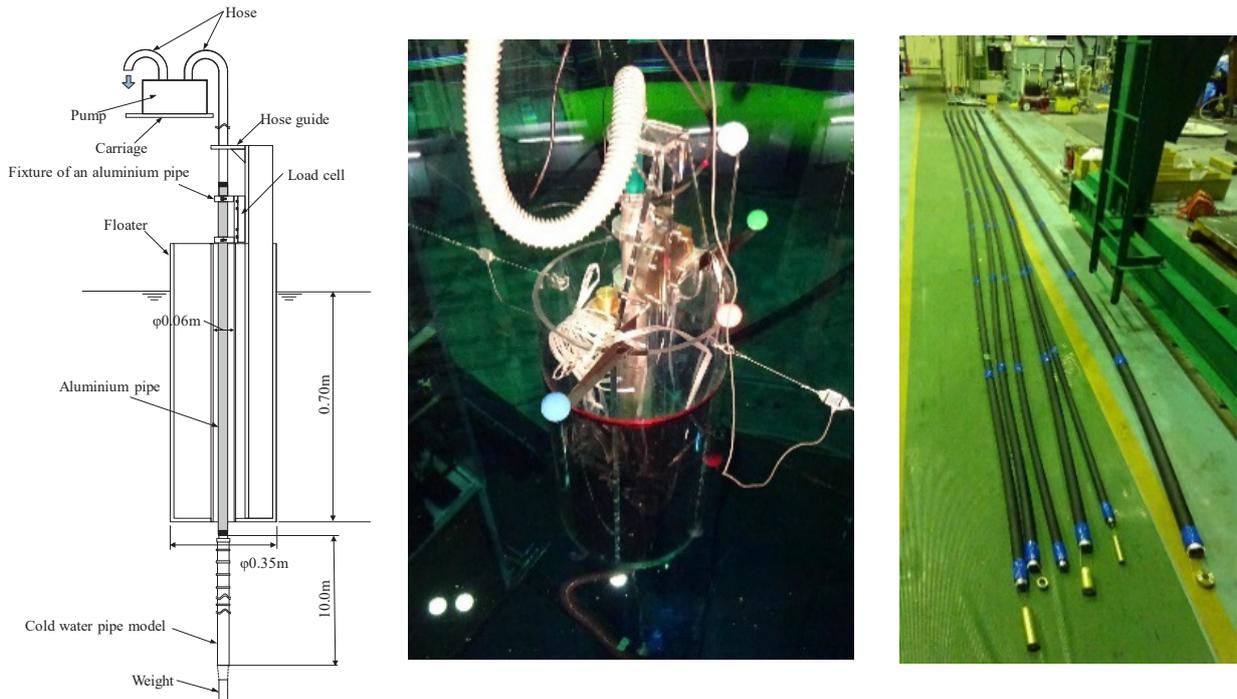


図 5.1 スパー型浮体式海洋温度差発電施設の試験模型図(左), 模型上部外観(中), 剛性等を変化させた6種の冷水取水管模型(右, 全長10m)

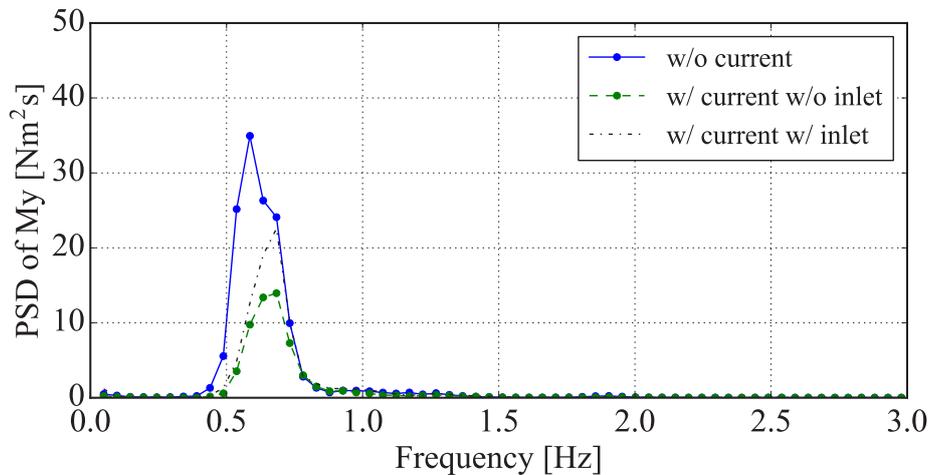


図 5.2 不規則波中での取水管取り付け部の y 軸曲げモーメント PSD
(有義波高 0.1m, 有義波周期 1.4s, w/o cur. : 潮流無・取水無, w/cur.w/o inlet : 潮流有・取水無,
w/cur.w/ inlet : 潮流有・取水有)

5.2 安全性評価のための数値計算

前項で示した水槽試験模型と同じ要目で外乱下における数値計算を実施した。図 5.3 に 1 方法として推奨する解析の流れをフローチャートで示す。3 次元境界要素法により浮体に作用するラディエーション力、ディフラクション力等の流体力を計算し、得られた流体力からメモリー影響関数を計算する。取水管等の線状構造物については有限要素法等により想定潮流中での静的つり合い位置を求める。次に線上構造物の VIV (Vortex Induced Vibration, 渦励起振動) 応答計算を行い、潮流中の変動振幅、それに伴う付加質量および抗力の変化分を求める。計算した浮体の流体力およびメモリー影響関数、線状構造物の静的つり合い位置および VIV による流体力変化分を用いて浮体・線状構造物連成解析を行う。

図 5.4 は、潮流有り条件および潮流無し条件における係留張力の変動振幅周波数応答特性である。数値計算、水槽試験共に海象条件が異なると値に違いが表れた。潮流の影響は大きく、潮流環境を再現して安全性を評価することが重要であると認識した。

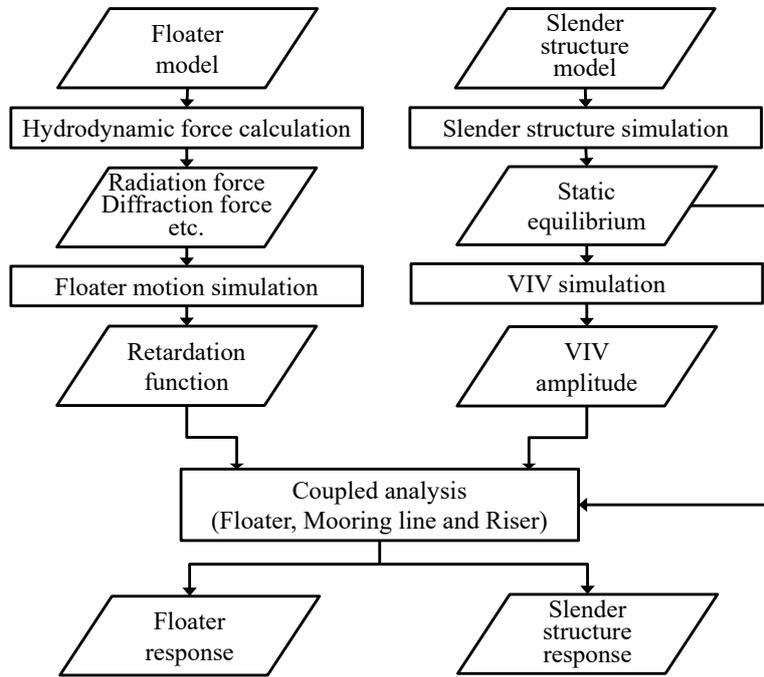


図 5.3 浮体式海洋温度差発電施設の安全性評価のための計算フロー

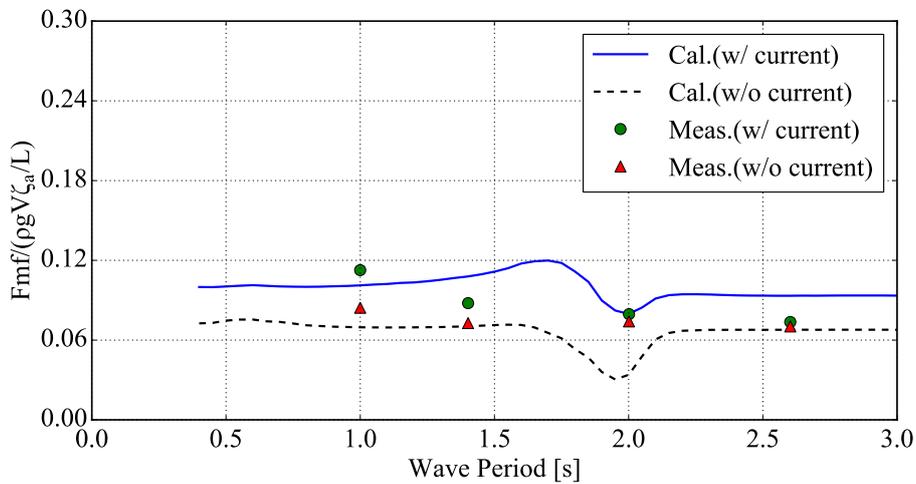


図 5.4 潮流有・無条件での上流側係留張力の計算結果と水槽試験結果の比較
 (横軸：模型相当規則波周期, w/o cur. : 潮流無, w/ cur. : 潮流有)

5.3 海洋温度差発電のまとめ

浮体式海洋温度差発電施設の安全ガイドライン案の作成を目的に、水槽試験、数値計算による評価が可能であるかどうかの確認検討を行った。他の浮体式発電施設と同様の安全性評価方法に加えて、海洋温度差発電の特徴的な対応として、取水管の内部流影響、潮流外力を考慮した評価が必要であることを示した。

6. おわりに

本稿では、2016年から7ヶ年の計画としてスタートした当所第1期中長期計画に基づく、重点研究「海洋再生可能エネルギーに係る基盤技術及び安全性評価技術の開発に関する研究」の実施内容の総括を行った。

風力発電施設に関する研究の取り組みとして、大型模型を使った水槽試験による性能・安全性評価、数値計算手法の開発、風車ブレードの制御方法による発電量等への影響評価、さらには今後利用が見込まれる合成繊維索を使った係留方法での安全性評価、合成繊維索に対する生物付着影響評価の結果を示した。安全基準に関する取り組みとして、合理的建造コスト削減が期待される浮体式洋上風力発電施設の損傷時復原性規則緩和策に対する適用可否に関する新規評価手法の提案も行った。本手法は、IECの新規定 IEC61400-3-2 Annex S として取り込まれるなど、成果の社会普及に対しても成果を上げた。

波力発電施設では、ポイントアブソーバー型を対象として発電性能向上のための研究開発、日本沿岸に設置した場合の発電量評価等を実施した。海流・潮流発電施設に関しては、水平軸型、垂直軸型の両方法の調査研究を実施した。海洋温度差発電施設においても今後の設置で有望なスパー型を取り上げ、安全性評価のための調査研究を実施した。

2023年度からは新たな第2期中長期計画がスタートしており、本研究開発の内容をより一層進展させる。また、時流として必要な研究開発に取り組むことで、我が国の再生可能エネルギー獲得促進に引き続き貢献していく所存である。

謝 辞

本稿で紹介した研究開発のうち、2.1項の研究成果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) の結果から得られた。また、2.3、2.4項の研究成果は国土交通省海事局請負研究、4、5項の研究成果は国土交通省海事局受託研究の結果から得られた。2.5.3項の研究成果は経済産業省資源エネルギー庁にて実施した実証研究事業データを利用した。3.2項の研究成果は同じくNEDOの委託業務 (JPNP07015) の結果から得られた。さらにJSPS科研費JP19H02124「持続可能なエネルギー基盤としてのリニア波力発電システム設計と電力量最大化制御」、JP19K15223「浮体式波力発電装置の実時間最適制御法の開発」、JP20K14976「モデルベース強化学習による波力発電装置の高効率化」の支援を一部受けたことを付記する。関係機関の皆様へ感謝する。

最後に7年間の研究開発を行う上で、既に退職された職員、また研究所内の多くの方々に関与、貢献いただいたことについて感謝申し上げる。

References

- 1) Cabinet Office: The Third/ The Forth Basic Plan on Ocean Policy (2018 and 2023), Cabinet Office, <https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan.html>.
- 2) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO): Report on Study for Achieving Carbon Neutrality by 2050, New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) (2020).
- 3) Chujo, T., Haneda, K. and Inoue, S.: Tank Experiment of Floating Offshore Wind Turbine with Large Scale Ratio Models, The 27th Ocean Engineering Symposium (2018).

- 4) Chujo, T.: Floating offshore wind turbine with single point mooring system connected by a turret, Ocean Energy Symposium (2021).
- 5) Srinivasamurthy, S., Iwamatsu, S., Hashimoto, K., Suzuki, H., Chujo, T., et al.: Study of slow-drift damping on wind tracking performance of a new-type FOWT ‘Optiflow’ with single-point mooring, Ocean Engineering Vol.242 (2021).
- 6) Haneda, K., Chujo, T. and Fujiwara, T.: Study on Evaluation of Motion and Elastic Response of a New Type of FOWTs in Waves Using Multibody Dynamics Analysis, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.36 (2022), pp.101-109.
- 7) Haneda, K., Chujo, T., Nimura, T., Kokubun, K., and Fujiwara, T.: Experimental Study of Wake Flow Effect Caused by FOWT Oscillation, Journal of Wind Energy, JWEA, Vol.44, Issue 1 (2020), pp.1-11.
- 8) Goupee, A., Gaertner, E., Abbas, N., Hall, M., and Barter, G.: Definition of the UMaine VoltturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine, National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-76773 (2020).
- 9) Abbas, N., Zalkind, D.S., Pao, L., and Wright, A.: A Reference Open-Source Controller for Fixed and Floating Offshore Wind Turbines, WIND ENERGY SCIENCE DISCUSSIONS (2021).
- 10) Haneda, K., Chujo, T., and Yoshimoto, H.: Parametric study for concept design of floating offshore wind turbines, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (under review).
- 11) Jonkman, J. and Musial, W.: Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment, Technical Report NREL/TP-5000-48191 (2010).
- 12) Chujo, T. and Kuroiwa, T.: Technological Developments of Floating Offshore Wind Turbines and Activities in National Maritime Research Institute, Proceedings of the 22nd Presentation Meeting of National Maritime Research Institute, (2022).
- 13) Chujo, T., Kojima, R., et al.: Investigation of Biofouling on Synthetic Fiber Rope for Safety Criteria of Floating Offshore Wind Turbines Mooring Design -Investigation in Hokkaido-, Underwater Technology 2021 (2021).
- 14) Chujo, T., Haneda, K., Komoriyama, Y., Fujiwara, T., Kokubun, K., Yamada, Y., Ochi, H., and Inoue, S.: Study for Damage Stability Operation on Floating Offshore Wind Turbines in the Revised IEC Standard, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.31 (2020), pp.171-182.
- 15) Haneda, K., Chujo, T., Nimura, T., Fujiwara, T., and Inoue, S.: Experimental Study on Collision Behavior Between a Floating Offshore Wind Turbine and a Ship, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.32 (2020), pp.65-76.
- 16) Dalgic, Y., Lazakis, I. and Turan, O.: Investigation of Optimum Crew Transfer Vessel Fleet for Offshore Wind Farm Maintenance Operations, Wind Engineering, Vol.39, No.1 (2015), pp.31-52.
- 17) Otsubo, K.: Stick/slip Phenomenon of a Crew Transfer Vessel Pushing its Bow Against an Offshore Wind Tower During a Transfer Operation, International Journal of Offshore and Polar Engineering (under review).
- 18) Kincardine Offshore Windfarm Ltd.: <https://pilot-renewables.com/>
- 19) Equinor ASA: Hywind Scotland: <https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland>
- 20) Fukushima Offshore Wind Consortium: <http://www.fukushima-forward.jp/project01/>
- 21) Hasumi, T., Yokoi, T., Haneda, K., Chujo, T., and Fujiwara, T.: Formulation and Analysis of Offshore Installation Time Estimation Model for Floating Offshore Wind Turbines, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.37 (2023), pp.69-80.
- 22) Maeda, H. and Yamashita, S.: Primary Energy Conversion Devices in Wave Energy Converter, Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.637 (1982), pp.306-326.
- 23) Naito, S.: Secondary Energy Conversion Devices in Wave Energy Converter, Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.637 (1982), pp.327-332.
- 24) IEA Ocean Energy Systems: An Overview of Ocean Energy Activities in 2022, IEA (2023).

- 25) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO): Report on Research and Development of Marine Energy / Research and Development on Next-Generation Marine Energy Power Production System/ Wave Energy Converter with Linear Generator, New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) (2019).
- 26) Koseki, T., Fujiwara, T., Umeda, J., Kokubun, K., Taniguchi, T., and Goto H.: System Design and Output Energy Maximization Control of Ocean Wave Linear Generators as Sustainable Fundamental Energy Source, Japan Science and Technology (2022).
- 27) 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.
- 28) Umeda, J., Taniguchi, T., and Fujiwara, T.: Development of model-based and model-free reactive control scheme: considering copper loss and movable-floater-displacement constraint for a wave energy converter, Journal of Marine Science and Technology, Vol.28 (2023), pp.439-451.
- 29) Umeda, J. and Taniguchi, T.: Impedance Control with Modeling Errors for Wave Energy Converters, Proc. of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.32 (2021), pp.559-562.
- 30) The Japan Society of Mechanical Engineers: Multibody Dynamics (1) –Fundamental Theory–, Corona Publishing Co., Ltd. (2006).
- 31) Taniguchi, T., Fujiwara, T., Umeda, J., Tadashi, N., and Toru, K.: Development of an Onshore Bench Test System for a Wave Energy Converter and Verification of a Real-Time Optimal Control, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.32 (2021), pp.99-108.
- 32) Taniguchi, T., Fujiwara, T., Umeda, J., Tadashi, N., and Toru, K.: Validation of Real-Time Nonlinear Model Predictive Control on Point Absorber Type Wave Energy Converter by Tank Test, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.33 (2021), pp.247-256.
- 33) Taniguchi, T., Fujiwara, T., Umeda, J., Tadashi, N., and Toru, K.: Motion Evaluation of Floating Point Absorber-type Wave Energy Converter by Kane's Equation, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.35 (2022), pp.65–76.
- 34) 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, Vol.31 (2020), pp.195-203.
- 35) Hirao, S.C., Umeda, J., Kokubun, K., and Fujiwara, T.: Tank test and numerical simulation of spar type floating OTEC, Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2021-62107 (2021).