



第23回 海上技術安全研究所研究発表会



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

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

洋上風力発電プロジェクトチーム

中條 俊樹

- 海洋再生可能エネルギーの状況

- 第1期中長期研究計画における研究の総括
 - 浮体式風力発電の研究の総括
 - 波力発電の研究の総括
 - 潮流・海流発電の研究の総括

- 第2期中長期研究計画の紹介
 - 第2期中長期研究計画の全体像
 - 浮体式風力発電の研究計画
 - 波力発電の研究計画

- まとめ

■ 海洋再生可能エネルギーの状況

■ 第1期中長期研究計画における研究の総括

- 浮体式風力発電の研究の総括
- 波力発電の研究の総括
- 潮流・海流発電の研究の総括

■ 第2期中長期研究計画の紹介

- 第2期中長期研究計画の全体像
- 浮体式風力発電の研究計画
- 波力発電の研究計画

■ まとめ

- 洋上風力発電は再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札（海洋基本計画）。
- 着床式が先行するも、EEZへの拡大では浮体式がメイン。

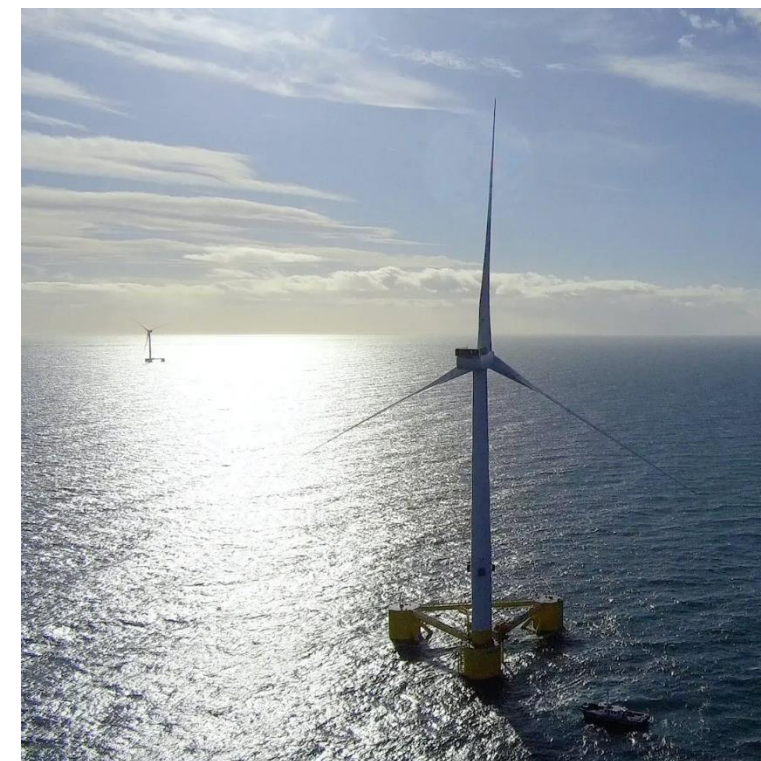
■ 浮体式風力発電

- 長崎県五島沖、福島県沖、北九州市沖の実証事業を実施、様々な浮体形式の建造・設置・運用・撤去の技術を実証。
- 長崎県五島沖で商用ウィンドファームの建造が開始。
- 政府による導入目標の設定・・・2040年までに浮体式を含め30~45GW
- 大型機（10MW以上）による実証研究が開始・・・グリーンイノベーション基金事業

- 欧州ではすでに商用ウィンドファームが稼働中。
 - テトラスパー等の新形式浮体の運転開始。
 - 1基の浮体に2基の風車を搭載したコンセプトも実証試験開始。

- 中国では複数基が運用開始。韓国も浮体式ウィンドファームの計画が注目を集める。

海洋再生可能エネルギーの状況



浮体式ウィンドファーム（左図：Hywind Tampen（ノルウェー） 右図：Kincardine（スコットランド））



台頭する中国の浮体式風力発電
（左図・中図：実証機の様子 右図：SCD Nezy2の1:10実証試験（実機の風車は中国企業想定））

（出典：各社HP）

（出典：<https://www.globaltimes.cn/page/202112/1240933.shtml>, <https://english.news.cn/20220530/b9be2b0d97764e84acdaf09958b09aec/c.html>）

■ 波力発電

- 国内外で実証試験・FSを実施。
- 発電方式は可動物体型、空気室型、越波型等、多様。
- 設置個所も港湾設置型、海底設置型、浮体式等が存在。
- 数100kW級の実証機を中心に研究開発を実施。

■ 潮流・海流発電

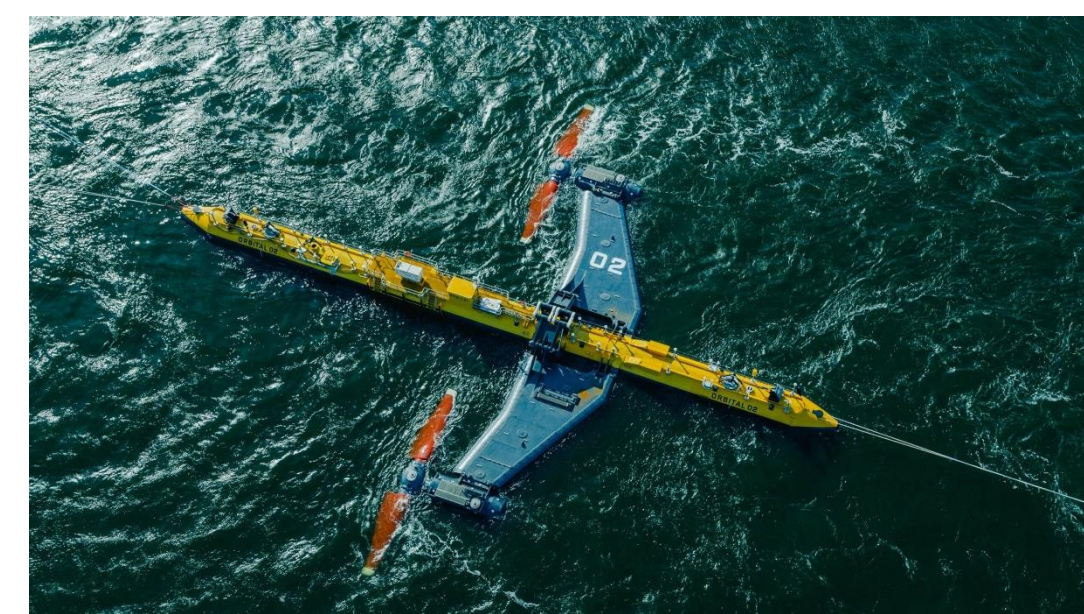
- 欧州を中心に1MW～2MW級を商用化。
- 国内でも500kW機の実証試験を開始。



波力発電の実証機
(CorPower、ポルトガル)



1.5MW潮流発電
(MeyGen、スコットランド)



2MW潮流発電の実証機
(O2、スコットランド)

■ 海洋再生可能エネルギーの状況

■ 第1期中長期研究計画における研究の総括

- 浮体式風力発電の研究の総括
- 波力発電の研究の総括
- 潮流・海流発電の研究の総括

■ 第2期中長期研究計画の紹介

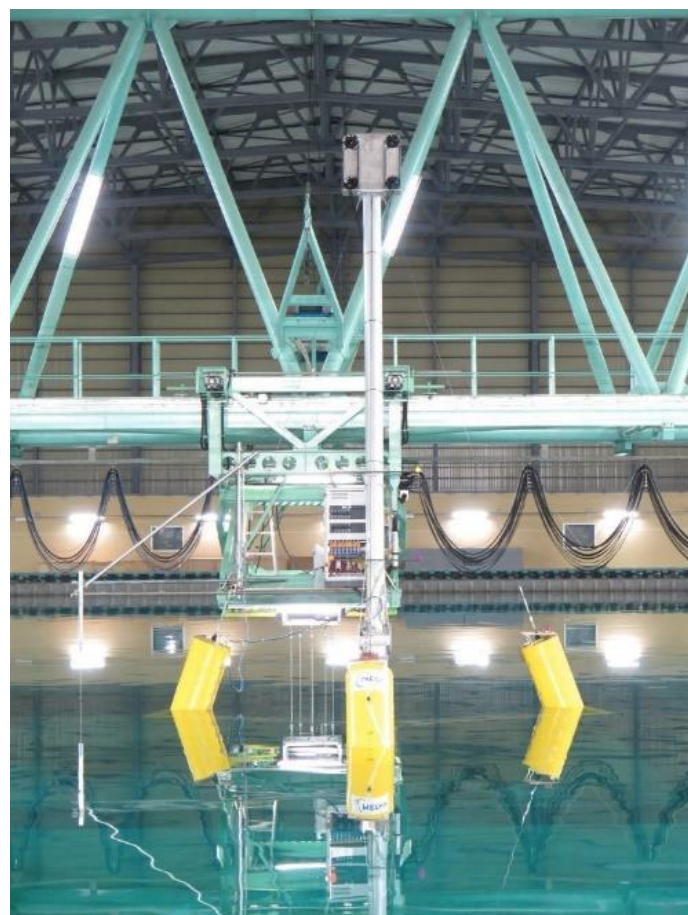
- 第2期中長期研究計画の全体像
- 浮体式風力発電の研究計画
- 波力発電の研究計画

■ まとめ

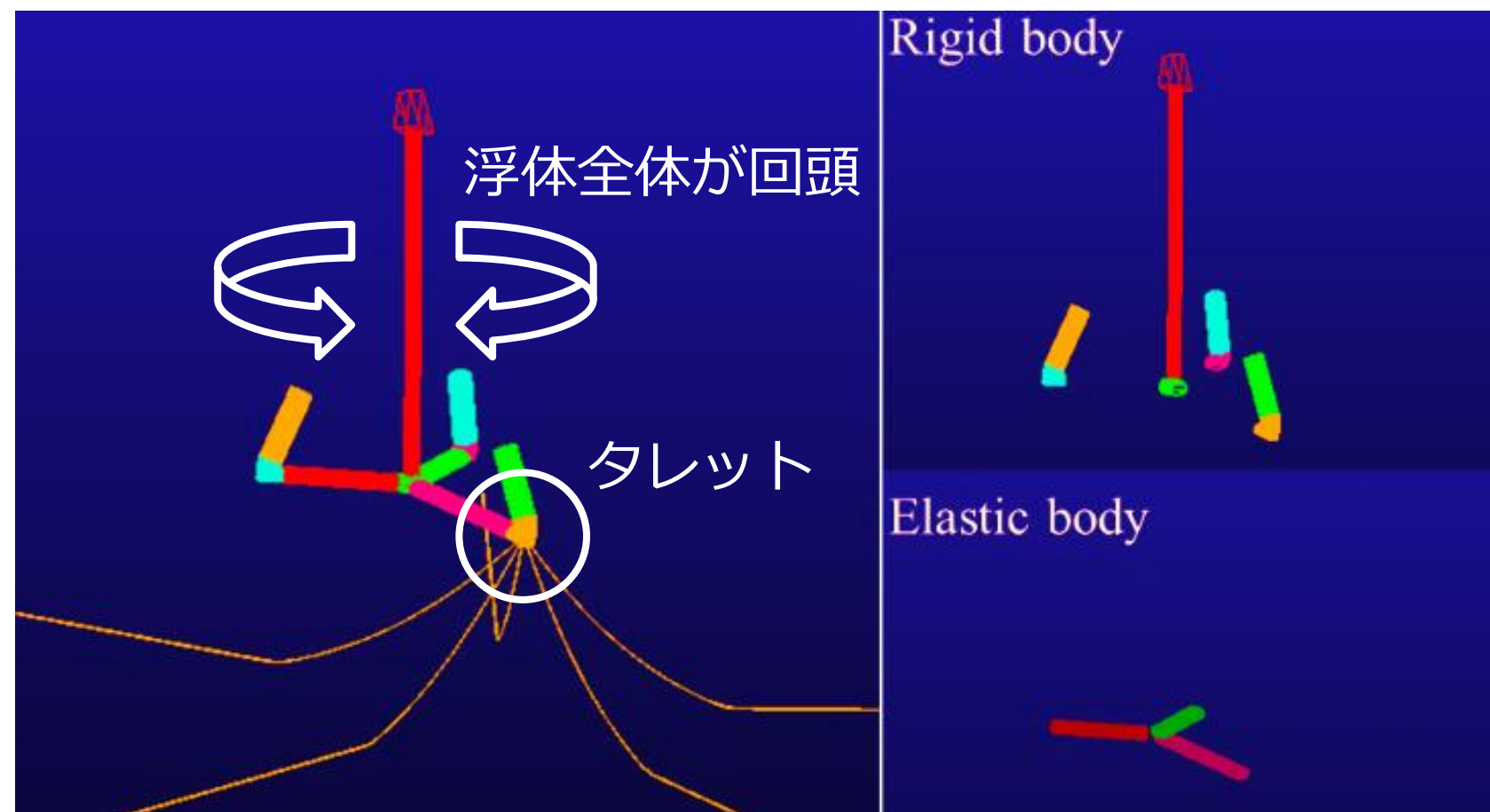
浮体式風力発電の研究の総括 —水槽模型試験・連成解析技術—



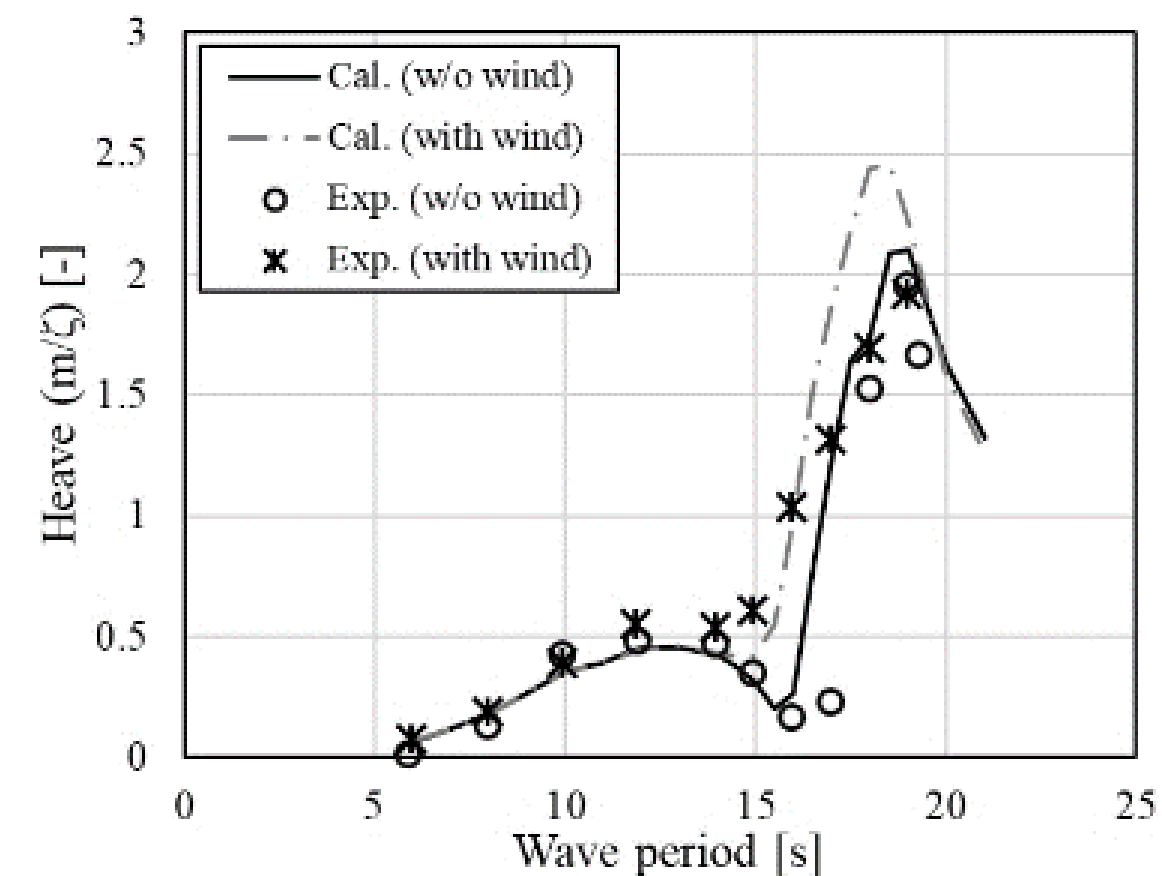
- 浮体式風力発電では、風車－浮体－係留の連成を考慮する必要。
- 水槽試験による検証を行いながら、連成解析技術を確立。
 - 主に汎用ソフトウェア（OpenFAST、Orcaflex等）をベースに水槽試験結果を活用し連成解析モデルを構築。
- タレットを用いた新形式の浮体・係留系については、機構解析ソフトウェア（MSC ADAMS）を活用。
 - 複雑な形状の浮体の波浪中応答について、良好な一致を得た。



水槽試験の様子



機構解析による解析モデル



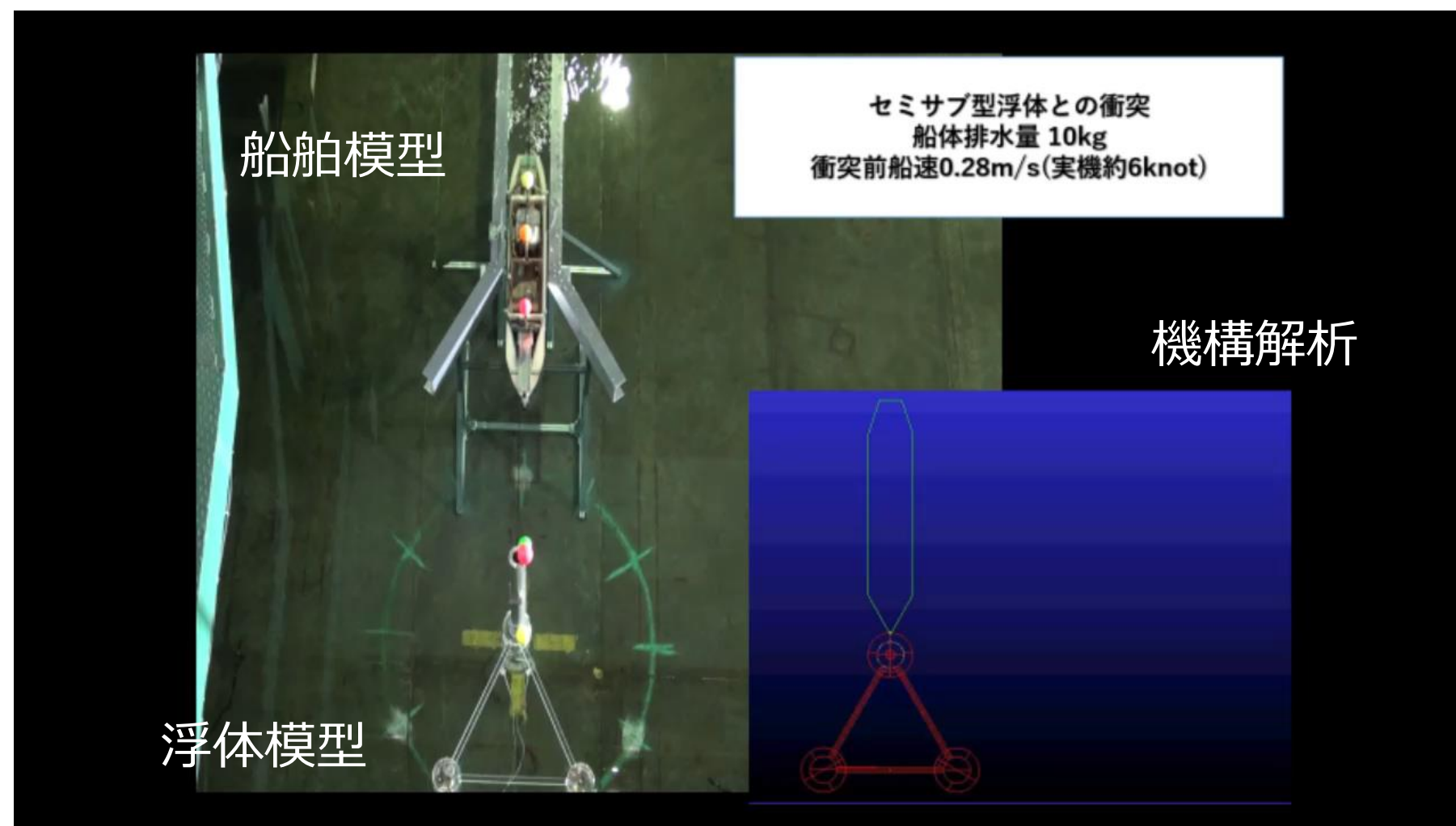
水槽試験と解析結果の比較

浮体式風力発電の研究の総括

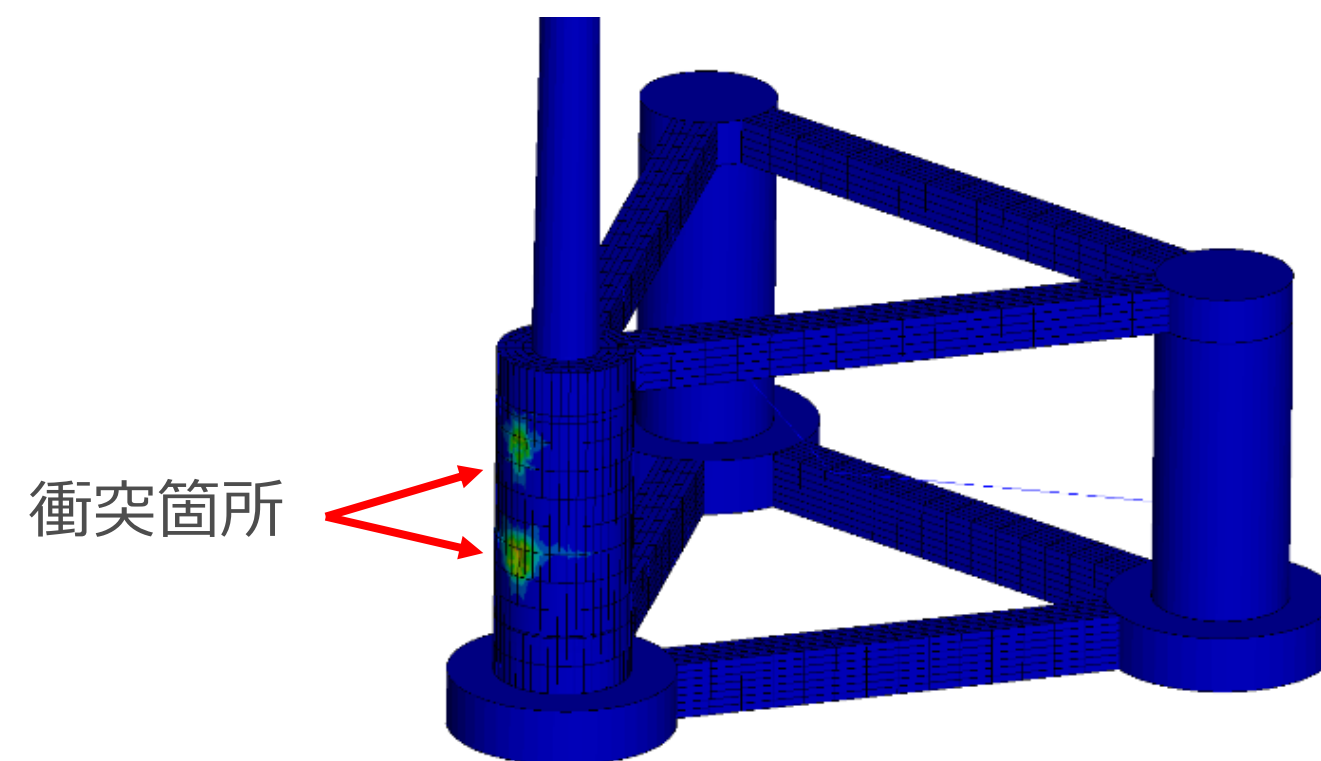
—水槽模型試験・連成解析技術—



- 浮体式風力発電の損傷時復原性の要不要について、IEC61400-3-2では、一定条件下で不要とする改訂。
- 不要となる条件が明確でないため、外板の損傷原因を船舶との衝突と設定し、衝突確率・衝突による破孔発生確率に基づき整理した。
- 衝突挙動について、水槽試験により衝突荷重や係留の影響等を明確にした。
- 損傷時復原性の要不要の判定手法をIECに提案、 IEC61400-3-2 Annex Sに採択の見込み。（国内ガイドライン改訂済）



水槽試験と機構解析の様子



FEM解析による衝突影響の評価

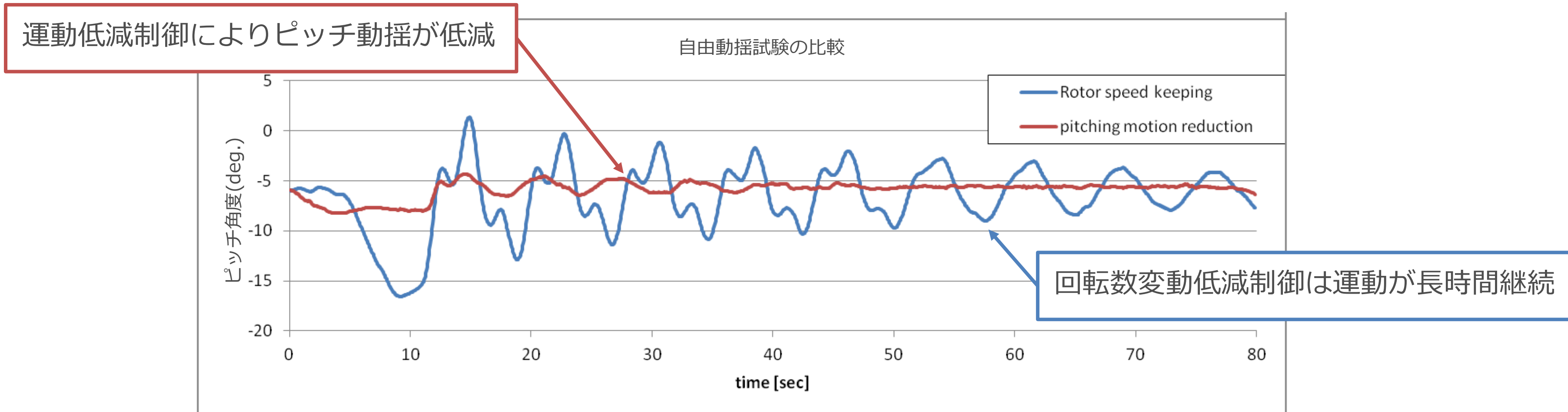
浮体式風力発電の研究の総括 —ブレードピッチ制御—



■ 浮体式風力発電では、発電量安定のためのブレードピッチ制御が浮体応答を増幅させる場合も

・・・ネガティブ・ダンピング現象

- 初期の検討では、ブレードピッチ制御可能な風車模型を用いて水槽試験によりネガティブ・ダンピング現象を把握するとともに、浮体運動を低減するブレードピッチ制御アルゴリズムを開発。
- ブレードピッチ制御により浮体運動を低減できることを水槽試験で確認。

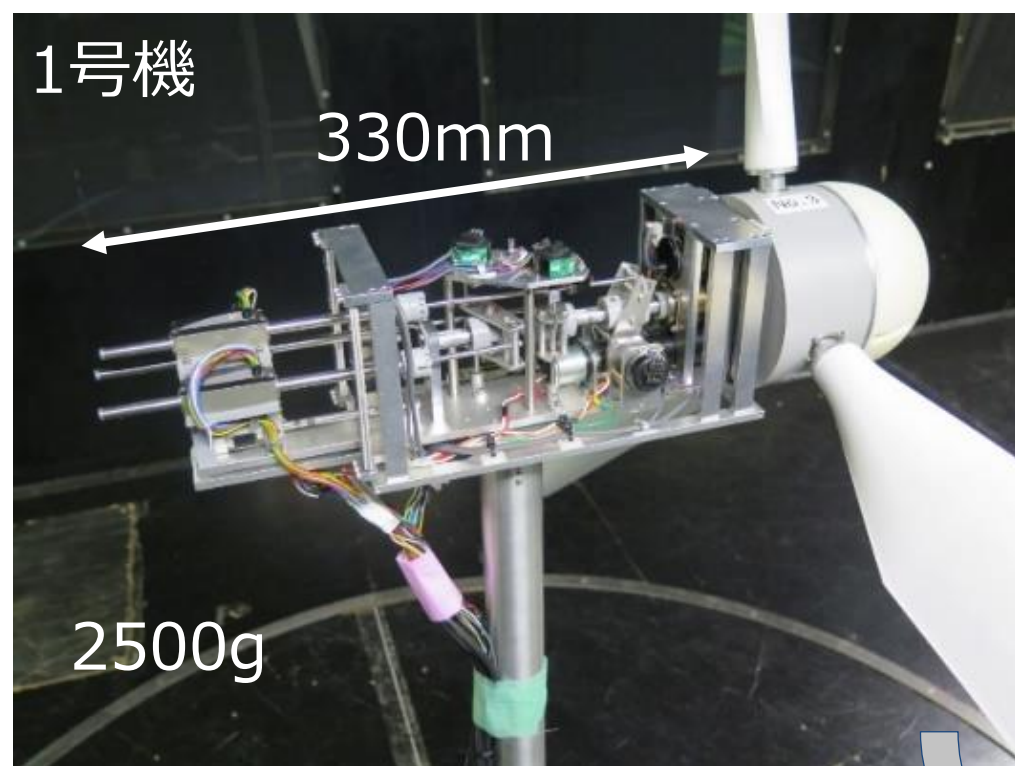


自由動揺試験におけるブレードピッチ制御による浮体運動の低減効果

浮体式風力発電の研究の総括 —ブレードピッチ制御—

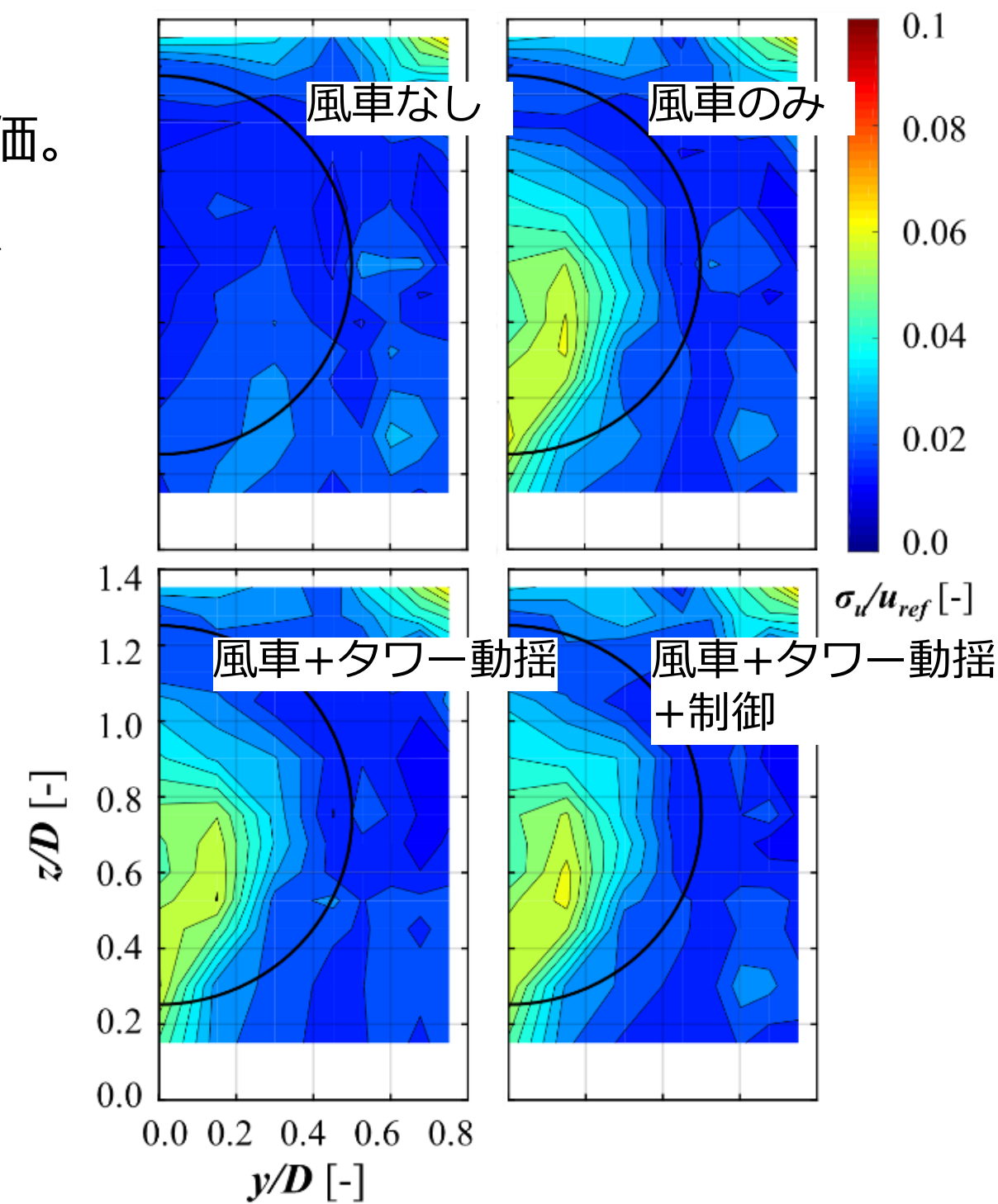


- 風車の大型化に伴い、ローター回転面上端と下端では風速の差が大きくなる。
- 大型化した風車に対し、3翼のブレードピッチ制御を独立して行うことで、より効率的な発電や疲労の抑制が可能に。
- 3翼独立制御可能な風車模型を製作し風洞試験を実施。
 - 浮体式を想定した制御の効果、風車後流への影響を風洞試験で評価。
 - 風車後流には、風上側風車の制御や動揺による影響は微小であり、ウィンドファーム内では共通のブレードピッチ制御が適用可能であることを示した。



1/3の軽量化に成功

風車模型



風車模型の風下側（距離2D）の風速分布

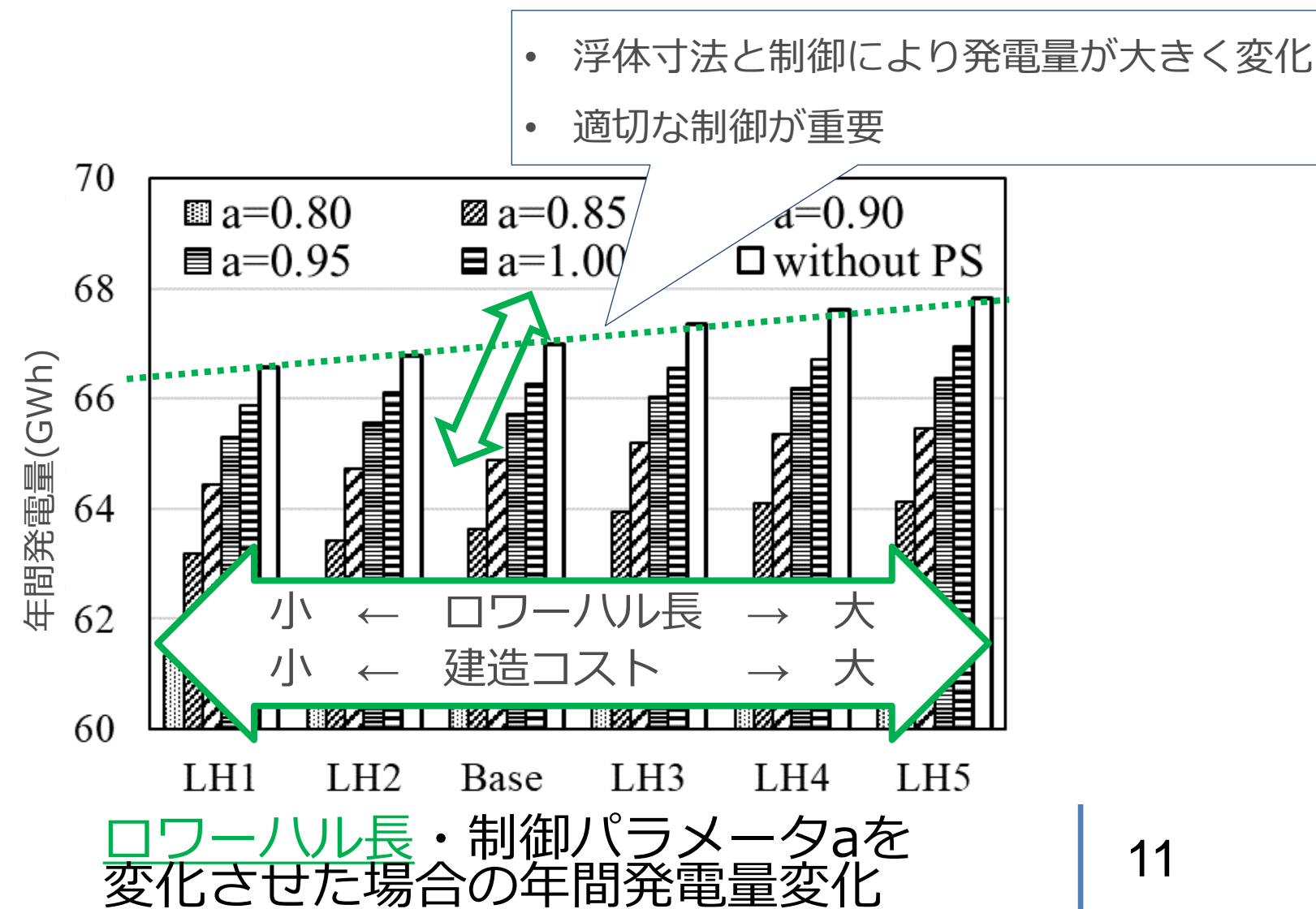
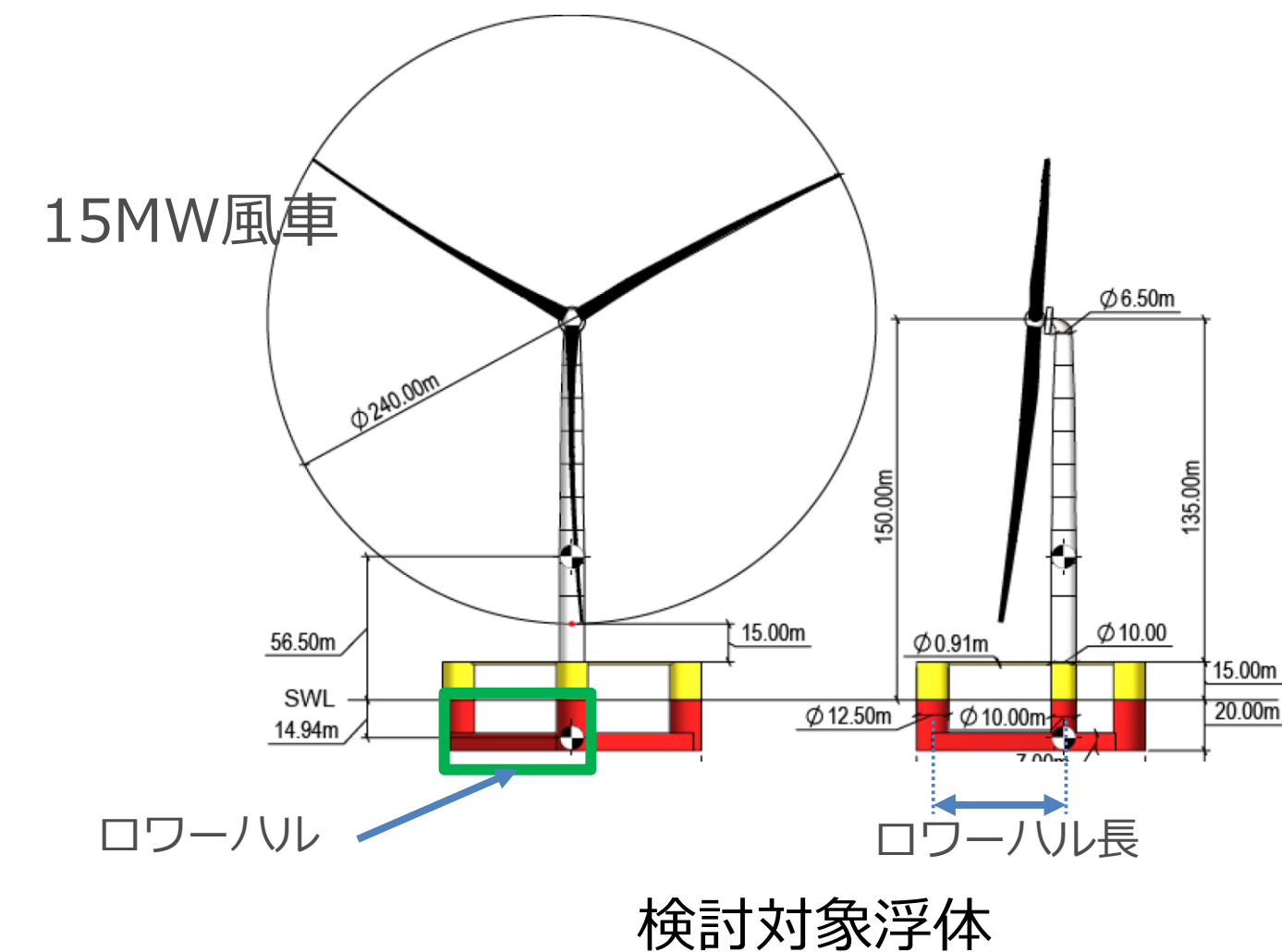
浮体式風力発電の研究の総括 —ブレードピッチ制御—



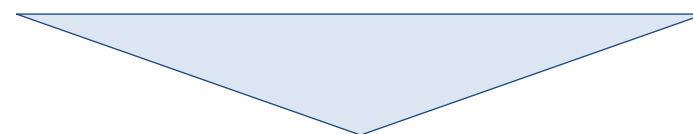
■ NREL（米国再生可能エネルギー研究所）開発の制御アルゴリズム「ROSCO（Reference OpenSource Controller）」を用いて、発電量最適化と浮体運動の低減、およびブレードピッチ制御による浮体の最適化（コンパクト化）の研究を実施中。

■ ブレードピッチ制御を効果的に用いることで浮体のコンパクト化につながるか検証。

➤ ブレードピッチ制御により浮体動揺を低減→許容される動揺量が同等ならば、浮体のコンパクト化、発電コストの低減が可能。

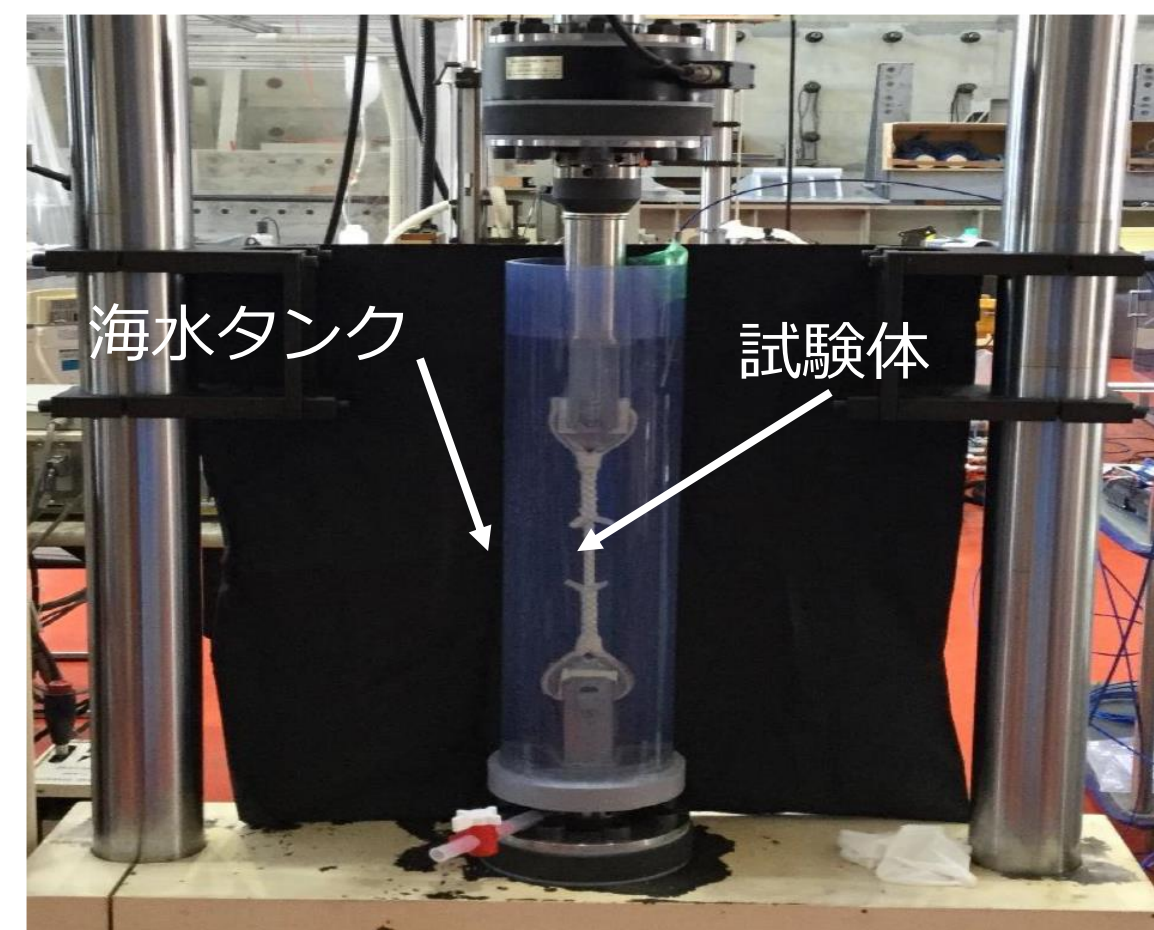


- 合成繊維索を用いた係留は、コスト低減に有効と考えられ、採用が増加すると予想。
 - 軽量のため、浮体・作業船をコンパクトに可能。港湾インフラへの負担軽減可能。
- 一方で、設計上の留意点が複雑、材料により使用実績・基準の記載内容に差。生物付着による影響が未解明等の課題。



■ 海技研の取り組み

- 数値計算による設計上の留意点の洗い出しを実施。
- サブロープに対する疲労試験を実施。
- 実海域浸漬試験により、生物付着の影響を評価中。



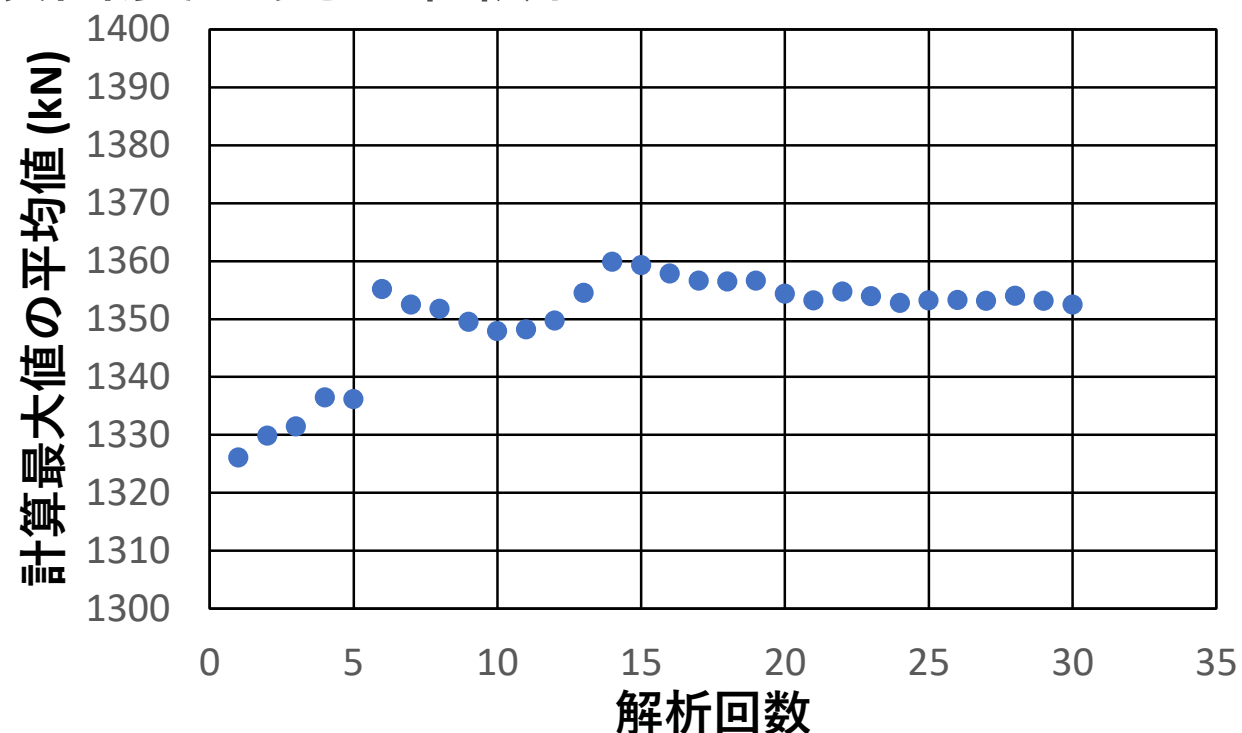
海水中を模擬した疲労試験

浮体式風力発電の研究の総括

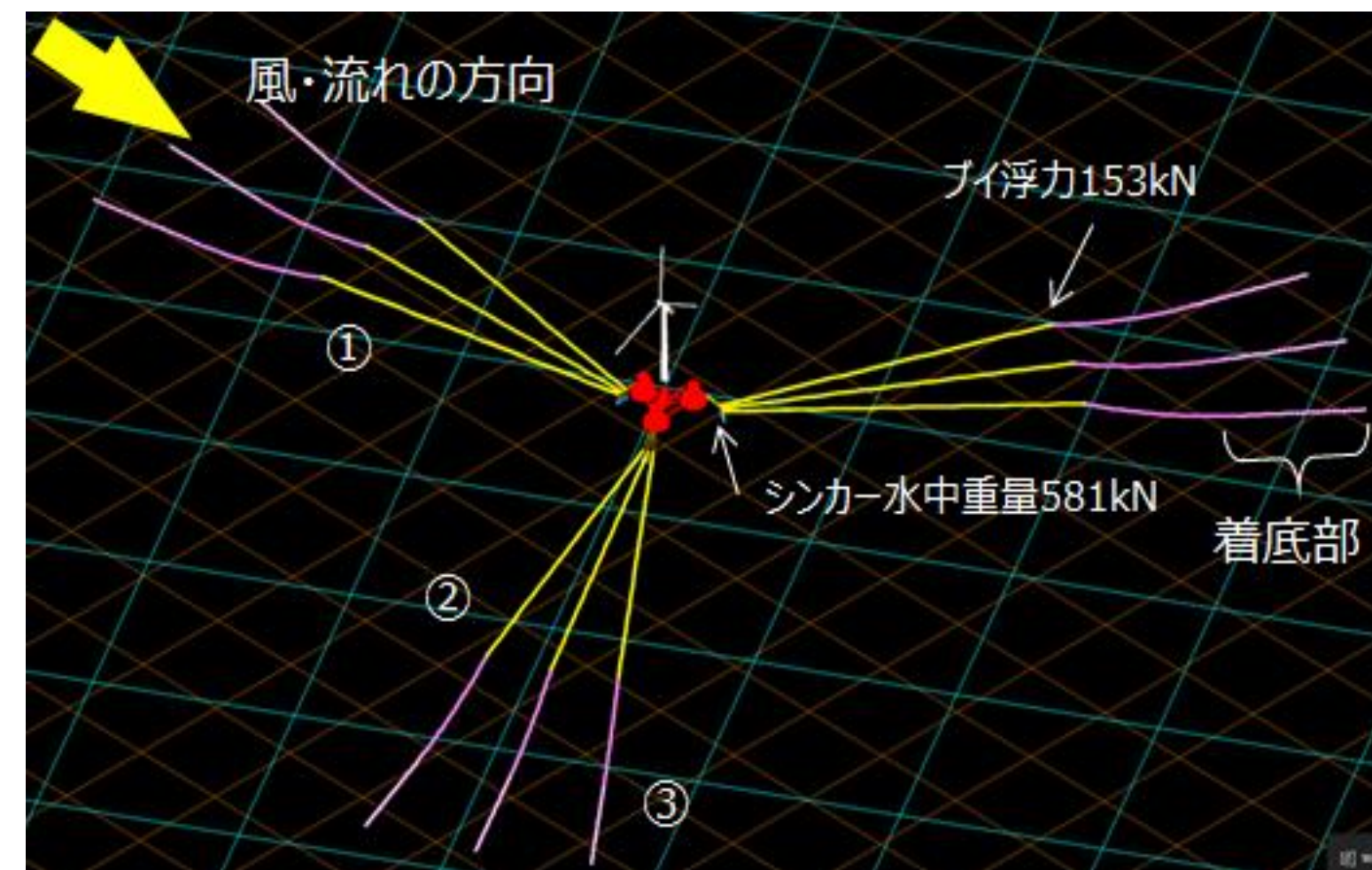
—合成繊維索係留—

- 合成繊維索を用いた係留の試設計を実施。
- 設計上の留意点について網羅的な検討を行い、以下の要注意点を抽出。

- 風・波・流れの入射方向の組み合わせ
- 波の方向分布の影響
- 最大張力となる海象条件
- 最大張力の発生箇所
- 最大張力推定のための解析回数
- 最大疲労被害度の発生箇所



ランダム計算における最大張力の収束の様子



水深の浅い海域における合成繊維索を用いた係留設計の例

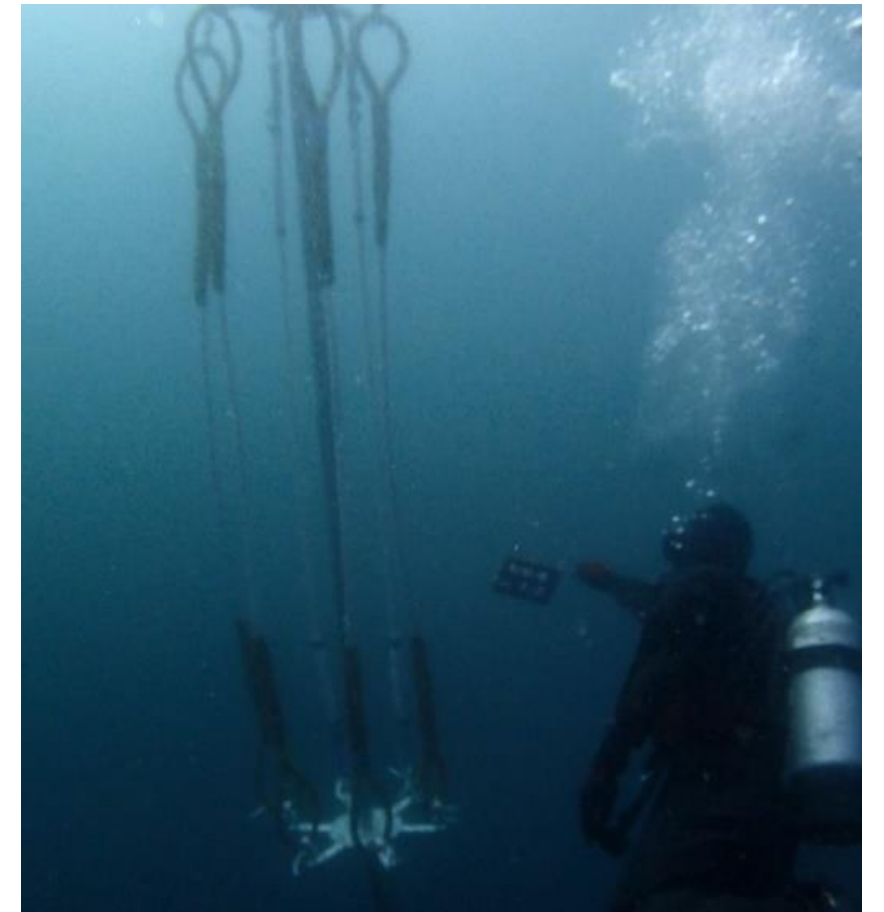
浮体式風力発電の研究の総括 —合成繊維索係留—



■ 生物付着により想定される合成繊維索係留への影響

- 付着により流れに対する投影面積が増加し、抗力が増加。
- 付着により重量が増加し、張力が増加。
- 付着生物が繊維を切断することによる強度低下の可能性。

■ 長期間の実海域浸漬試験により付着量を観測するとともに、強度評価を実施。

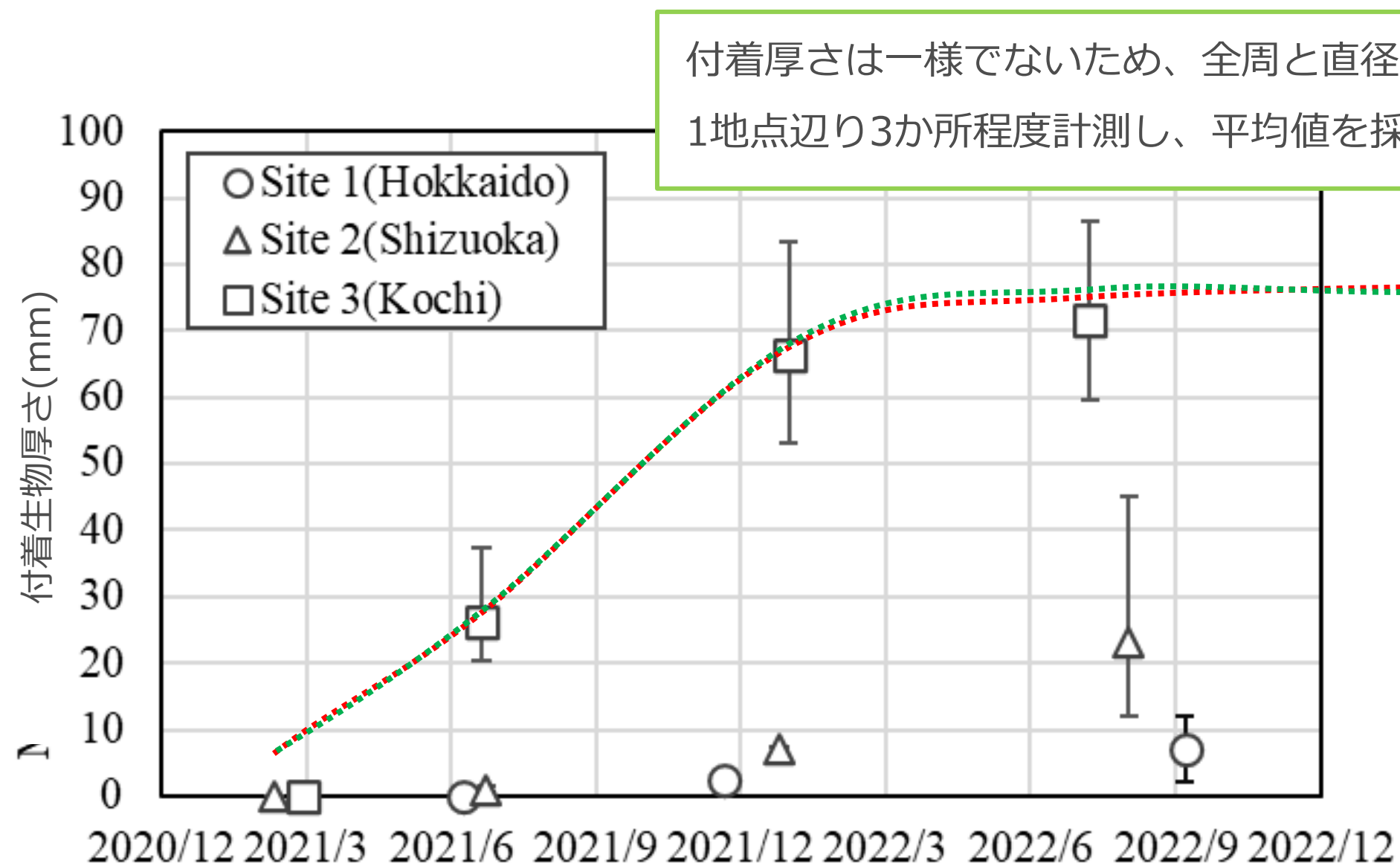


実海域における合成繊維索試験体の浸漬試験の様子
(左図：北海道 中図：静岡県 右図：高知県)

浮体式風力発電の研究の総括 —合成繊維索係留—

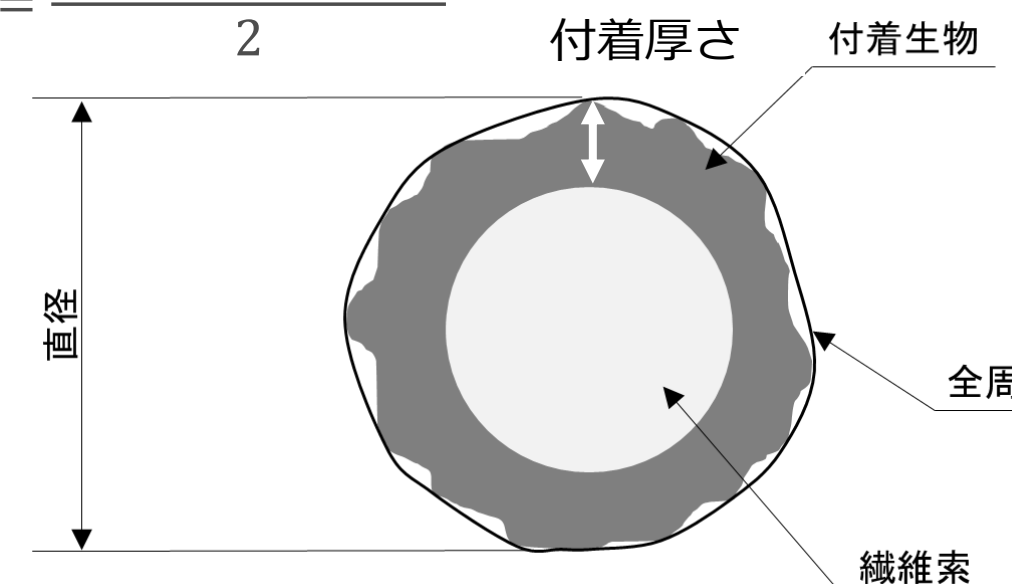
■ 付着量の経年変化（設置後1.5年程度の経過観察から）

- 南の海域ほど付着量は大きい。
- 季節変化：夏季に付着量増加、冬季は増加が少ない。
- 今後も継続して付着量の経過観察、強度評価の予定。



ナイロンロープに対する付着量の計測結果（抜粋）

$$\text{付着厚さ} = \frac{\text{全周} / \pi - \text{索直径}}{2}$$



繊維索における付着厚さのイメージ

■ 発電方式・・・可動物体型、空気室型、越波型等

■ 可動物体型の中でポイントアブソーバー型を中心に研究を実施。

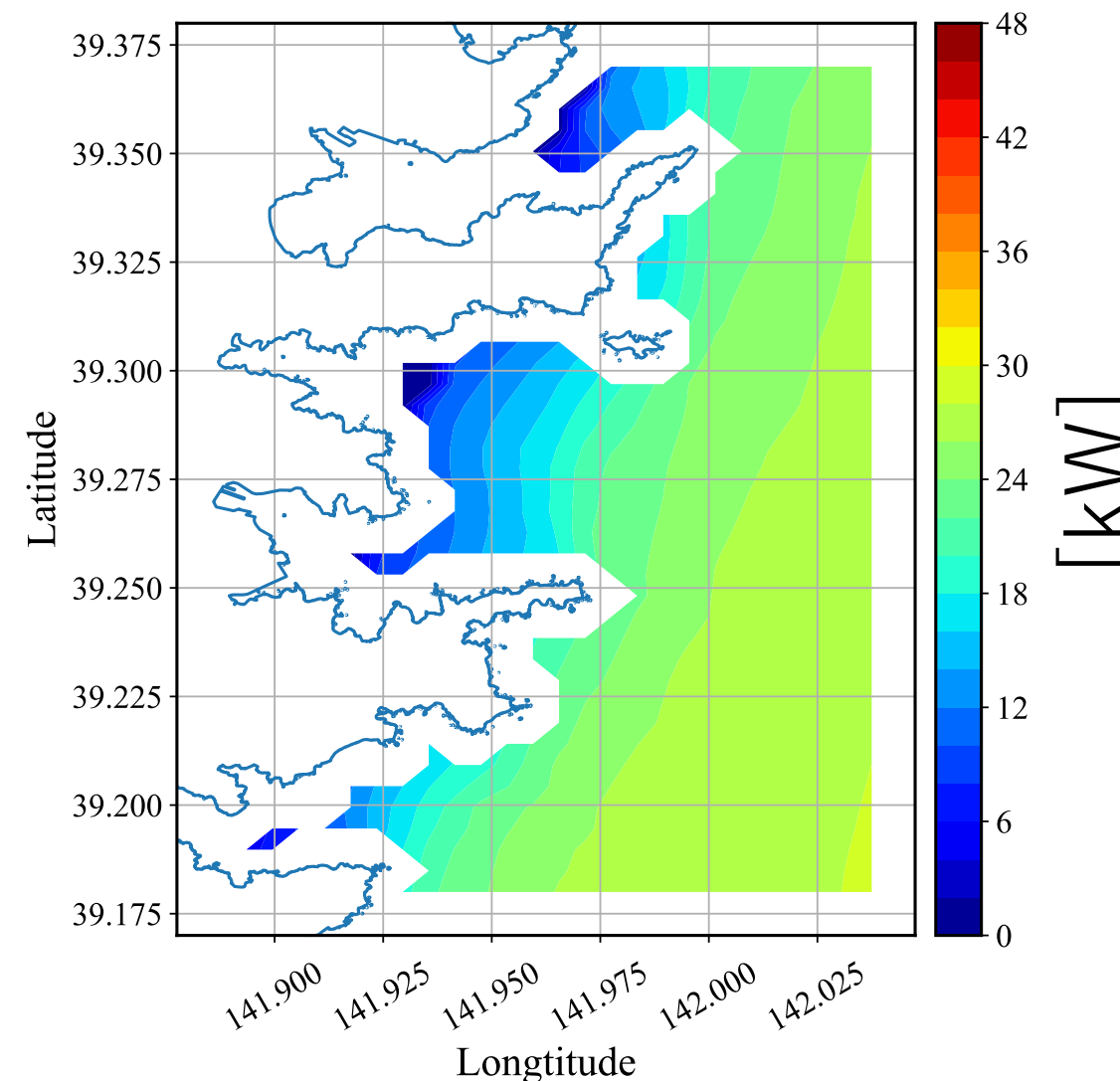
■ 波の予測に基づくフィード・フォワード制御、フロートの可動範囲の制約、モデル化誤差を考慮した制御アルゴリズムの開発を実施。

■ 海域の特性を考慮した発電量を評価。

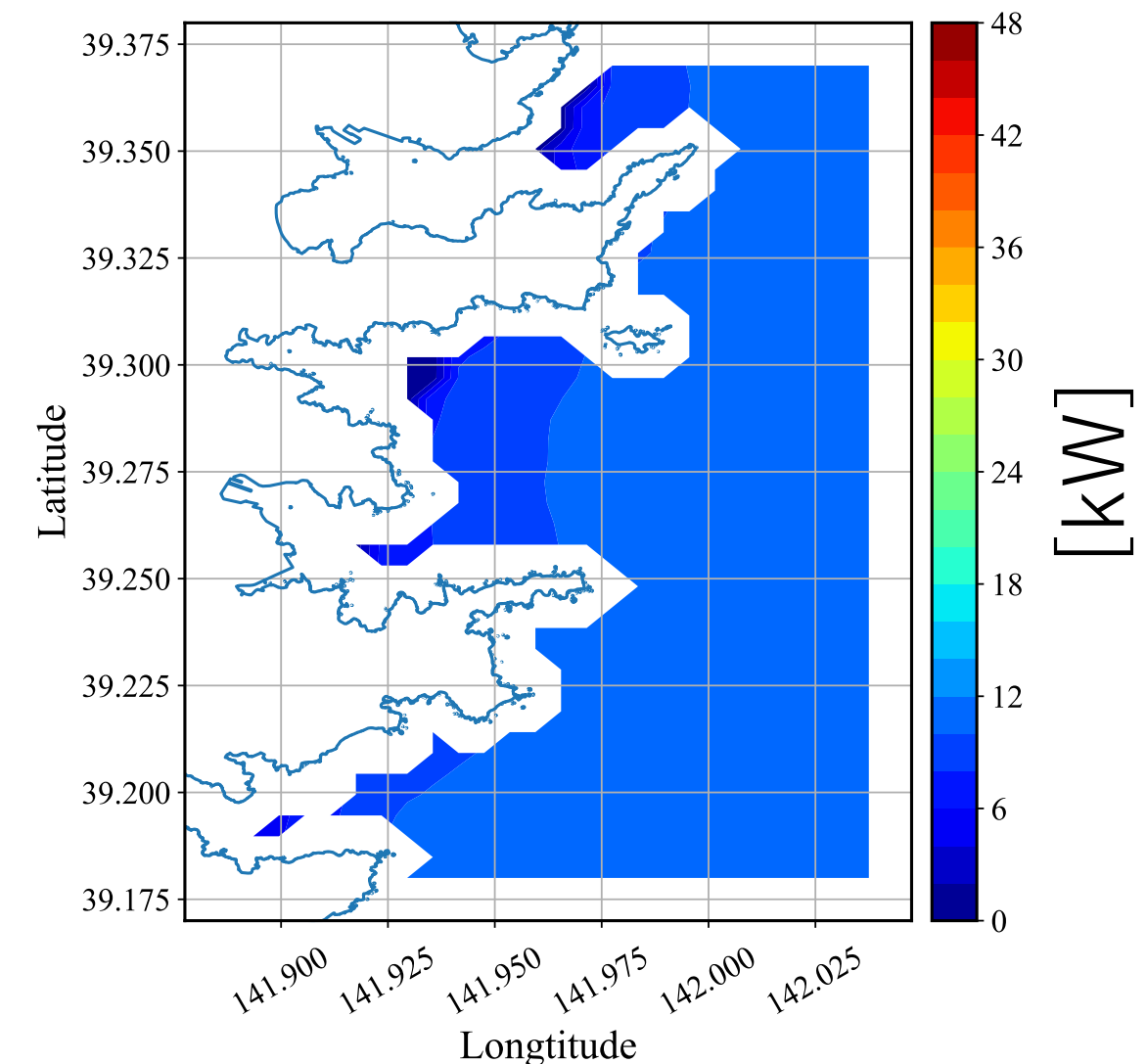


ポイントアブソーバー型波力発電のイメージ

岩手県釜石市沖



Power Spectrum制御



銅損を考慮した同調制御

- 海底設置型、海面上に位置する形式と海中に位置する形式に分類される。
- 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。
 - 施設の運動、構造に働く応力、係留張力が大きくなるような安全上留意すべき状態（発電状態、故障の形態）を抽出。
 - 成果を安全ガイドラインにまとめた。

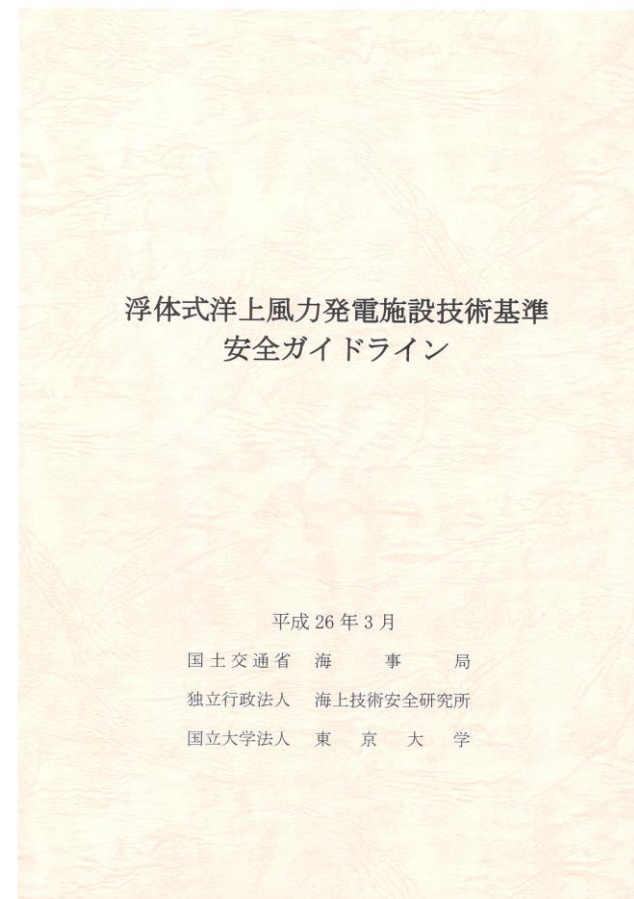


海中浮遊式水平軸型の模型

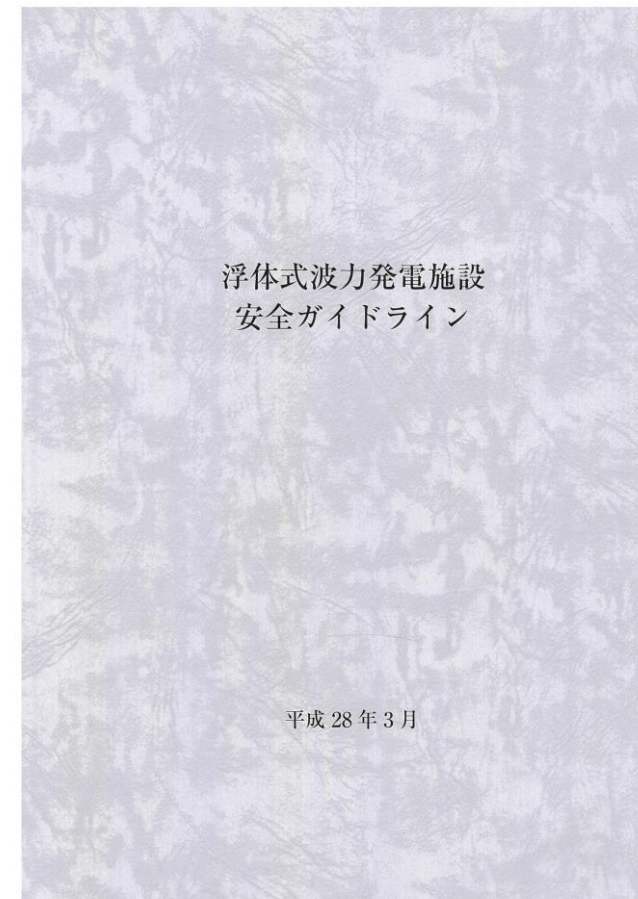


海上設置式垂直軸型の模型

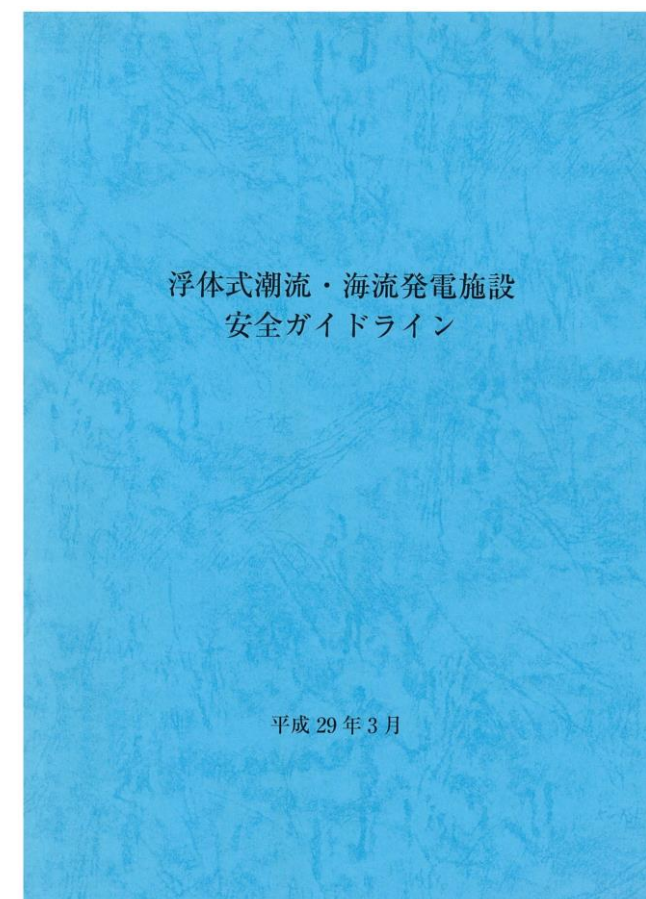
- 浮体式風力発電、波力発電、潮流・海流発電等について、水槽試験・数値計算を実施。
- 浮体システムの波浪中応答、係留張力等を精度よく推定可能に。
- 発電システムが供用期間中に遭遇する事象を想定し、安全上・設計上の留意点を中心に整理し、ガイドラインとしてまとめた。
- 浮体式風力発電の研究成果の一部は国際基準に展開された。



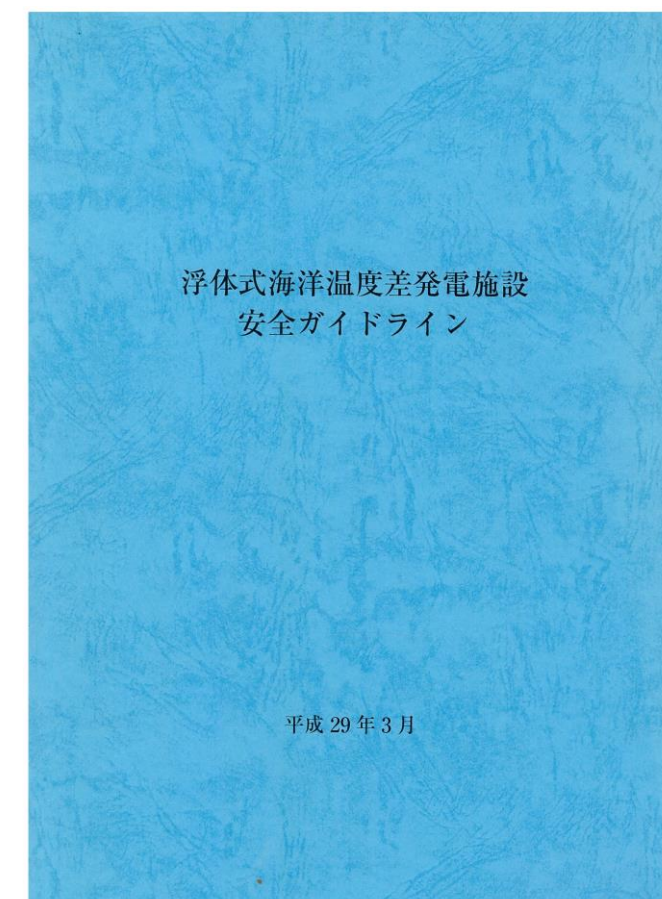
浮体式洋上風力発電



浮体式波力発電



浮体式潮流・海流発電



浮体式海洋温度差発電

- 海洋再生可能エネルギーの状況

- 第1期中長期研究計画における研究の総括
 - 浮体式風力発電の研究の総括
 - 波力発電の研究の総括
 - 潮流・海流発電の研究の総括

- 第2期中長期研究計画の紹介
 - 第2期中長期研究計画の全体像
 - 浮体式風力発電の研究計画
 - 波力発電の研究計画

- まとめ

第2期中長期研究計画の全体像



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	→			実海域検証・実用化	→		
	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	→			実海域検証・実用化	→		
	他要素相互影響評価		→			→		
	生物付着影響評価	→	強度評価	→		ガイドライン化	→	
③デジタルツイン技術の構築	遭遇海象推定手法	→			} 実海域検証・実用化			
	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	→		実海域検証	→			
	複数基の安全性評価			→				
	複合型システム				→			

■ 目指すべき研究目的

- 風車の大型化への対応
- ウィンドファーム化へ対応
- 発電コスト低減への貢献

■ 第2期中長期研究計画における浮体式風力発電の研究課題

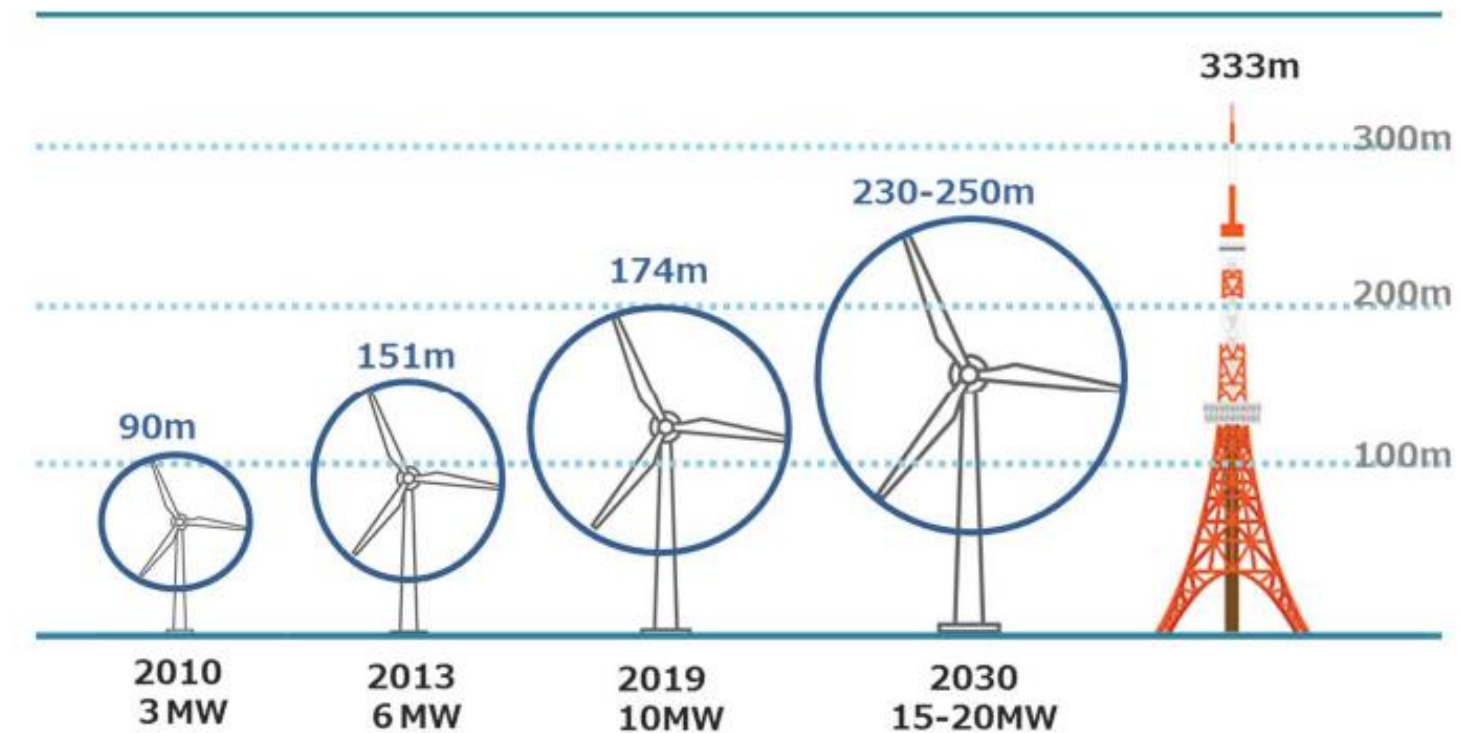
■ 大規模ウィンドファームの安全性評価手法の構築

- 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

■ 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

- 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
- 海洋付着生物についても実海域試験を継続する。

■ デジタルツイン技術の構築



風車大型化の流れ

■ 大規模ウィンドファームの安全性評価手法の構築

■ 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

- 係留索張力の直接モニタリング（ロードセル、歪ゲージ等）は厳しい環境下では継続困難。
- 浮体変位はGPS等により比較的容易に計測可能、破損時の代替も容易。
- 浮体変位から係留索張力の把握、さらには係留索の状態把握を可能にする技術開発を実施。

⇒現状の検査では、ROV等を用いて係留索の状態を直接観測する必要があるが、本技術開発によりO&Mコスト低減につながると期待。

■ 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

- ウィンドファーム内の浮体すべてを同一タイミングで検査することは、コスト面・時間面で負担大。
- リスク評価手法等に基づき、検査対象を合理的に選定し、検査コスト削減につなげる。

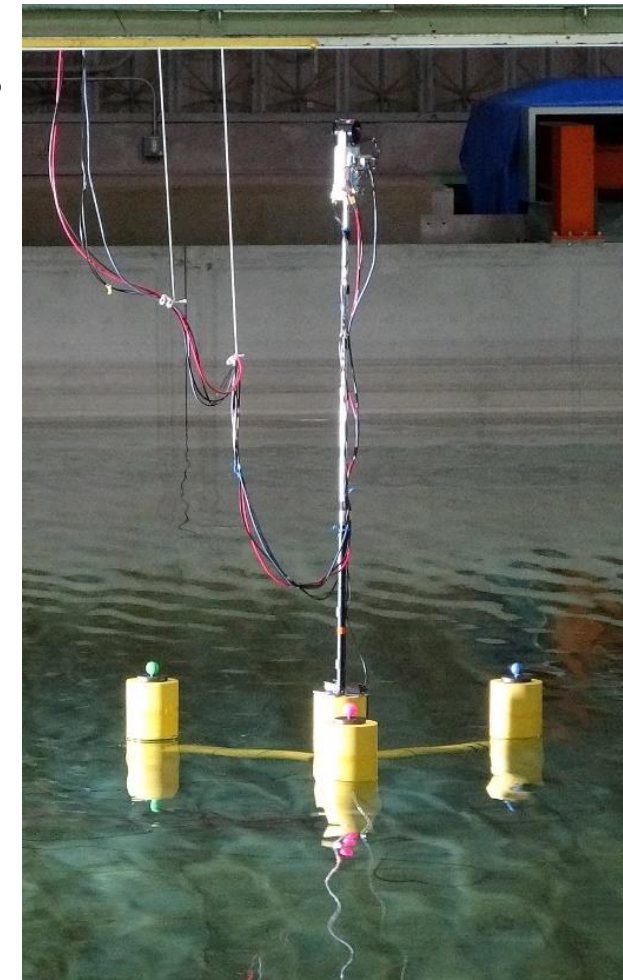
■ 製造コストそのものを低減させるための浮体の最適化に関する研究開発

- ブレードピッチ制御の効果を設計時に考慮する、製造しやすい浮体形式を選択する等、浮体最適化を実施。

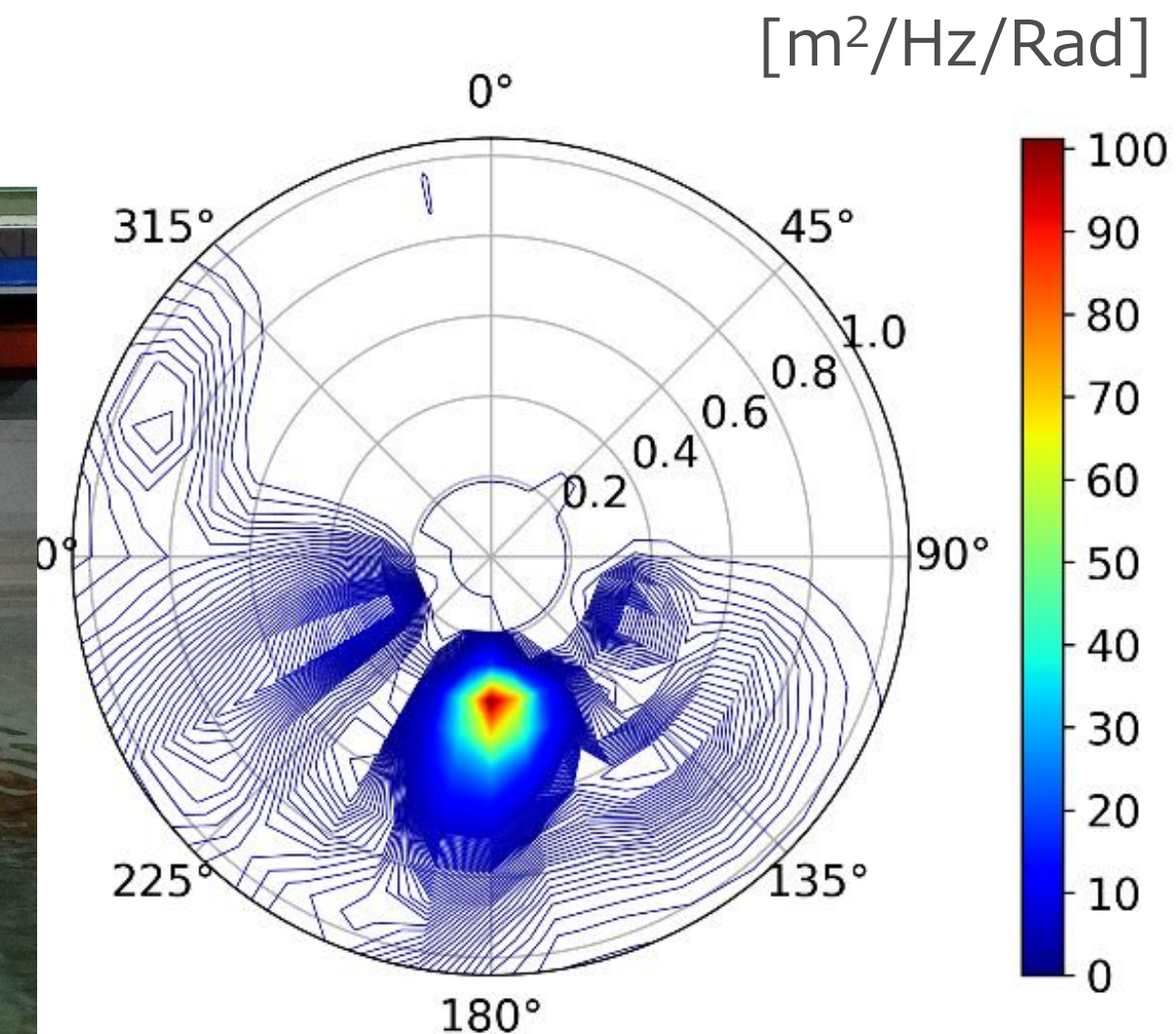
■ デジタルツイン技術の開発

- 遭遇海象の推定手法の構築。
 - ✓ ウィンドファームにおいては、海象計測は限られたポイントのみ。
 - ✓ 浮体の応答から個々の浮体の遭遇する海象を推定する。
- 浮体に働く応力推定手法の構築。
 - ✓ 推定された海象を入力とし、浮体に働く応力を求める。
 - ✓ FEM解析・水槽試験（2023年6月）を実施。
- 係留索に働く張力推定手法の構築。
- 疲労余寿命の推定。
 - ✓ 構造及び係留索の疲労余寿命を推定する。

- デジタルツイン技術により安全性を確保しながらO&Mコスト低減につなげる。



水槽模型試験の様子



海象推定の例

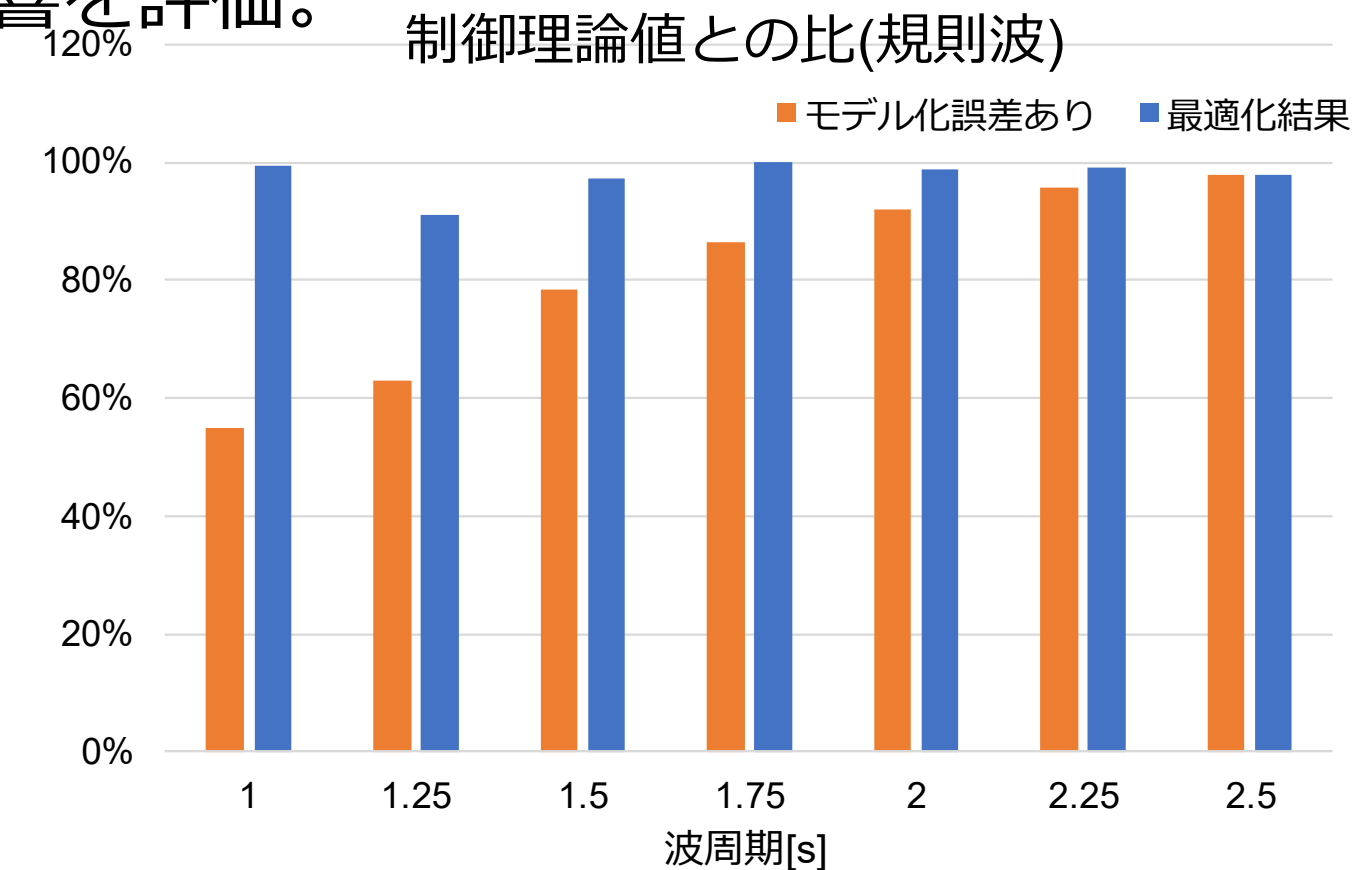
■ ポイントアブソーバー型波力発電の高効率化に関する現在の研究を発展させる。

- 従来の制御技術は、制御のモデル化誤差の影響を受けて低下。
- 波力発電装置の運動データから波力発電装置の運動の回帰モデルの構築、その回帰モデルを用いて制御が可能な制御アルゴリズムを開発。
 - 水槽試験を実施しアルゴリズムを検証
 - さらなる効率向上のため、浮体形状を変更した場合の影響を評価。



■ 国内の実証プロジェクトへの参画を目指す。

- 複数浮体を連結させた場合の安全性評価。
- 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の研究。



モデル化誤差による発電性能の低下の例

- 海洋再生可能エネルギーの状況

- 第1期中長期研究計画における研究の総括
 - 浮体式風力発電の研究の総括
 - 波力発電の研究の総括
 - 潮流・海流発電の研究の総括

- 第2期中長期研究計画の紹介
 - 第2期中長期研究計画の全体像
 - 浮体式風力発電の研究計画
 - 波力発電の研究計画

■ まとめ

- 7年間にわたる第1期中長期研究計画において、浮体式風力発電、波力発電を中心に安全性評価、発電性能向上等に着目した研究開発を実施。
- 特に浮体単機の波浪中応答評価については、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。
- 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。
- 皆様のご支援・ご協力をお願いいたします。

ご清聴ありがとうございました



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
National Maritime Research Institute

