

2023年度成果報告会
プログラムNo. 32

風力発電等技術研究開発／
洋上風力発電等技術研究開発／
次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究
(バージ型)

発表日：2024年2月1日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 佐藤 俊介

丸紅株式会社・丸紅洋上風力開発株式会社

問い合わせ先 丸紅株式会社 <https://www.marubeni.com/jp/>

1. 目的

本事業では、水深 50～100m 程度の比較的浅水深の海域を対象に、低コストな次世代浮体式洋上風力発電システムを開発し、洋上風力発電の更なる普及を促すとともに、本事業の成果が国際競争力強化に資することを目的とする。

2. 期間

2015年1月 ～ 2024年3月

3. 目標(中間・最終)

- 日本近海の気象・海象条件に即した低コスト次世代浮体式風力発電設備および施工方法の開発・検証と共に、比較的浅い海域(50m～100m)に適した係留システムの検討を行う。
- 実機観測データを解析・分析し性能・安全性の評価結果を明らかにすると共に、浮体式洋上風力発電設備における保守管理技術の確立を目指す。その他環境影響への有無や関係機関等との協調について検証する。
- 実証研究の結果を踏まえ売電価格、建設コスト、維持管理コストを検証し、将来の浮体式洋上ウインドファームの実用化に関する実現可能性を検証する。

4. 成果

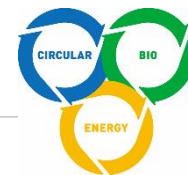
1. 次世代浮体式洋上風力発電システムの開発

1. 1 3MW浮体式洋上風力発電システムの設計・製作・施工

- 1) 設置海域について海域調査を実施し、外部条件を確定し、これに基づく設計値を設定し、鋼製支持浮体の開発・設計を実施した。
- 2) 50年再現極値海象条件下でのスラミングの発生可能性について検討し、スラミング荷重について水槽実験と数値解析を実施し設計上の対策を講じた。
- 3) 浮体構造部について、大規模なメンテナンスが必要とならないように、防食仕様を設計した。
- 4) 風車製作における品質管理システム、組立作業、試運転手法を習得し、日本での組立、メンテナンス体制を構築した。
- 5) 連成解析による係留系解析に基づき3点×3ラインの浅海カテナリー係留の仕様を定め、調達を行い、効率的係留技術の検討を実施した。
- 6) 日本海事協会の認証を得て支持浮体の建造に着手した。支持浮体完成・曳航後、北九州においてタワー、風車を搭載し、曳航後所定の位置に設置し、経済産業省九州産業保安監督部の審査を受け使用前安全管理審査を受審して稼働を開始した。

1. 2 浮体設備の分析検証

- 1) 観測された外部条件(風、波浪、水流)の収集・整理を行い、設計に用いた外部条件の検証を実施し概ね一致していること確認した。支持構造の応答について観測値から浮体、係留への負荷の作用状況を確認した。
- 2) 解析値、水槽実験結果を比較し設計手法が妥当であることを検証し、設計によって目指した浮体動揺性能が実機においては実現されていることを確認した。併せてバージ型に関する水槽実験の有効性を確認した。



4. 成果

1. 3 観測

- 1) 観測に関しては、風車の稼働状況計測、浮体の動揺、浮体構造内力、係留索張力の計測、風況、気象・海象の観測、藍の島における風況観測のシステムを構築した。
- 2) 観測・計測データはネットワークを介して響灘陸上と東京大学に設置したサーバーにデータを蓄積するシステムを構築した。観測システムについては、データ共有システム、データ収録システム、ネットワークの保守、改良を実施した。

1. 4 海域利用者や行政機関との調整

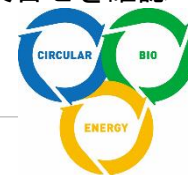
- 1) 航行安全対策を検討し、漁業との共存を図り、地元の理解を得て、海域占有許可の取得した。
- 2) 風車設置前、設置作業中、設置後において継続して漁獲試験を継続し、また設置後において魚類蝟集効果把握調査を実施し、実証機設備が魚類に与える影響を確認した。

1. 5 コスト評価

本実証事業のコストを整理し、商業化時のウインドファームを想定し、コスト低減可能性を検証した。また、種々の条件の設定の下、事業性評価を実施し、海外事例との比較検証を行った。

2. 保守管理技術の開発

- 1) 風車、係留索の維持管理に関して、点検作業の効率化、ピッチシステム等の改善を実施し安定した風車の稼働を実現した。
- 2) 洋上風車の保守管理技術の開発、鋼製浮体の保守管理技術の開発、システム全体の保守管理技術の開発に関して、ダイナミックケーブルの深度の遠隔監視を実施し、遠隔監視の有効性を示した。
- 3) ROVによる外観監視・計測を実施するとともに、ROVに装着したキャビテーションジェットツールにより効率的な付着生物の除去を実施した。
- 4) 浮体の外観点検におけるドローンの有効性を確認し、浮体部の3Dデータを作成した。
- 5) 故障予知診断システムにおいてデータ蓄積を継続し、故障予知モデルを追加作成して、異常と実際の事象の突合せを確認した。



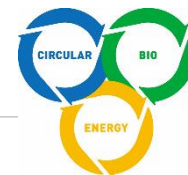
4. 成果

3. 環境影響評価

北九州市環境影響評価条例に従い、配慮書・方法書・準備書・評価書手続を完了し、事業規模の変更を受けて、自主的環境アセスメントを実施した。水質、水中音、水中生物、鳥類、生態系、付着生物の項目について工事前の調査、工事中の現地調査、稼働中の現地調査を比較し、影響が小さいことを確認した。

4. 低コスト次世代洋上風力発電システム技術の確立に必要な項目

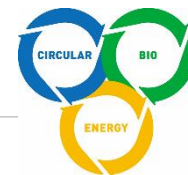
- 1) 浮体の動揺抑制技術の検討に関して、観測データから動揺特性、スラミングや越波の発生状況などの基礎情報の収集を行った。
- 2) 製作・組立・溶接技術の検討に関して、浮体構造に関して、外板の板厚、補強材数・配置による溶接量の削減の検討を行った。
- 3) 施工技術の検討に関して、係留接続後の浮体の設置精度について、施工時のデータを比較し、設置精度が良好であることを確認した。
- 4) メンテナンス技術の検討に関して、鋼製浮体に設置した観測センサーや監視カメラにより、アクセス状況、運用状況のモニタリングを実施した。
- 5) 効率的係留技術の確立に関して、合成繊維ロープを用いた係留について、合成繊維ロープに関する基礎試験を実施し、係留システム系について検討した。また、タワーブイを用いた係留の開発をおこなった。
- 6) 電力品質の評価に関して、系統連系後、計測機器を用い、力率、瞬時電圧変動、フリッカ、高調波流出電流の観点から電力品質の評価を行った。
- 7) 電気工作物の保安管理体制の確立に関して、「みなし設置者」制度を活用し、電気工作物の自主保安管理体制を構築した。
- 8) 商用機における事業性等を検討に資するため、実際の商用環境での設備利用率がどの程度になるか分析を行った。



4. 成果

5. 国民との対話

- 1) 地元への情報発信と対話に関して、北九州エコタウンセンター内における常設展示を開始した、北九州で開催されるエコテクノ2017年以降2022年まで展示会に出展した。また、地元における親子科学工作教室、大学における特別講義を実施し、地元の理解向上に努めた。
- 2) 一般社会を対象にした情報発信と対話に関して、一般社会向けホームページを開設し、研究通信の定期更新、気象・海象情報のリアルタイム配信を行った。



目次

1. 浮体設備の分析・検証(日立造船)
2. 観測システムの構築と運用(東京大学)
3. 保守管理技術(コスモエコパワー、日立造船)
4. 風車、係留索の維持管理(グローバル)
5. 効率的係留技術の確立(東京大学)
6. 電力品質の評価(九電みらいエナジー)
7. 環境影響評価(コスモエコパワー)
8. 海域利用者や行政機関との調整、コスト評価等 (丸紅)
9. 国民との対話(東京大学)

研究体制

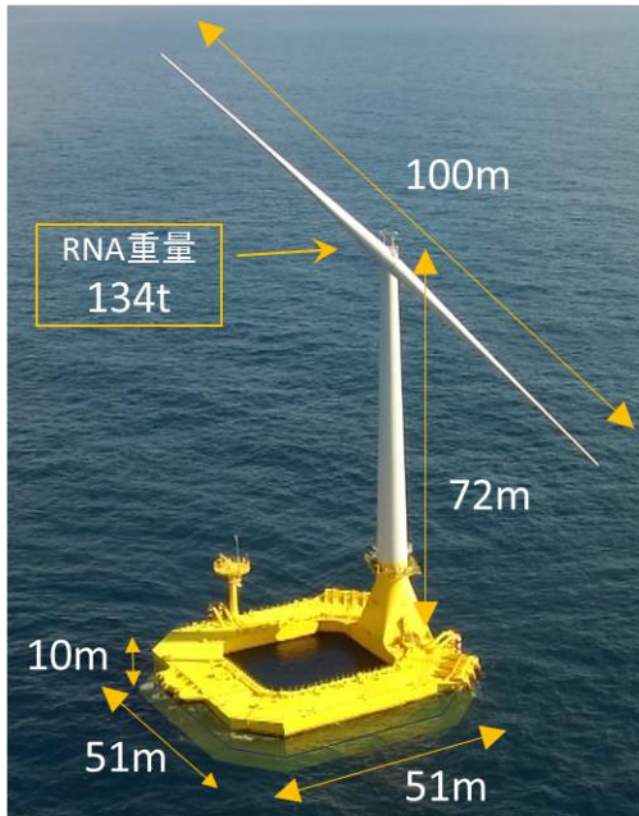


※九電みらいエナジー及びコスモエコパワーは、2021年度で実証研究事業を完了し、2022年度以降は4者で実施。

風力発電設備の概要

風力発電設備の諸元

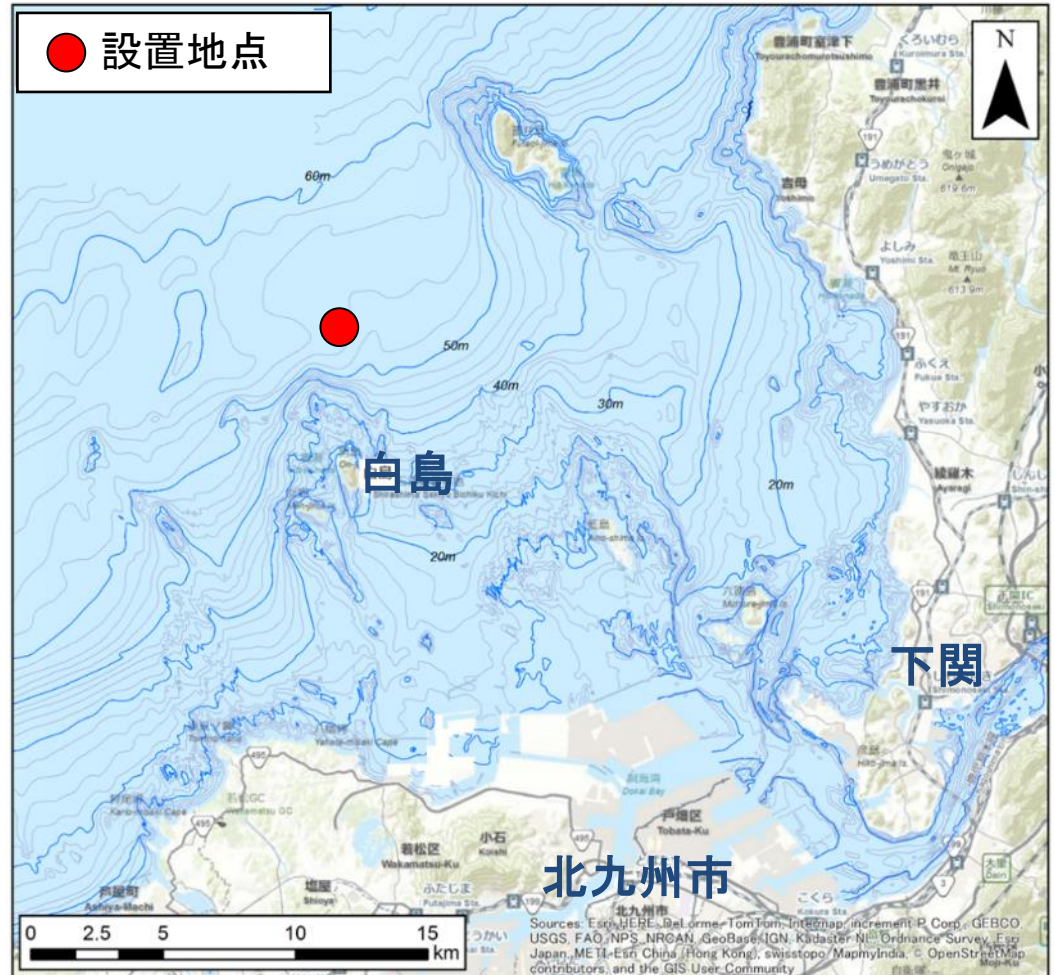
3MW／2枚翼アップウインド



鋼製／バージ型

本体重量 3,000t(風車、バラスト重量除く)

風力発電設備の設置地点

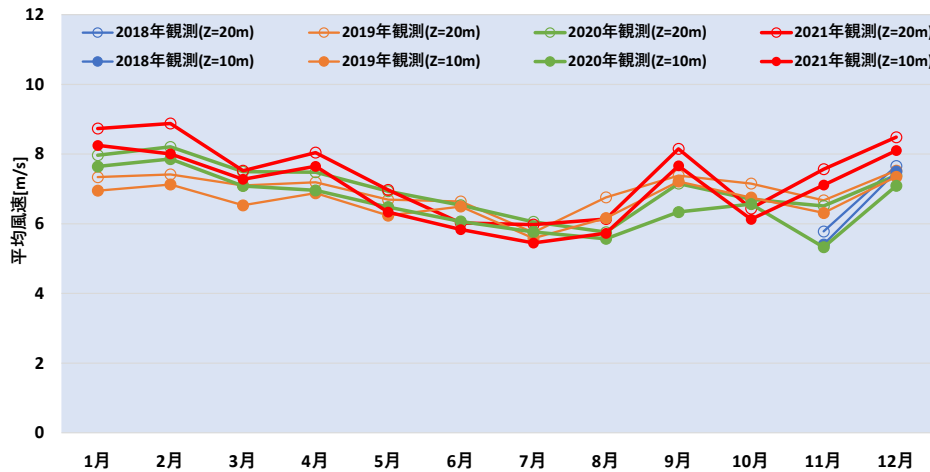


1. 浮体設備の分析・検証 —外部条件の調査—

【成果】

- 外部条件(風、波浪、水流)について観測データを蓄積し、観測データの解析を行い、年変動も含めた外部条件の調査を実施した。
- 異なる計測機器で観測値の比較を行うことにより、実測されたデータの妥当性を確認した。

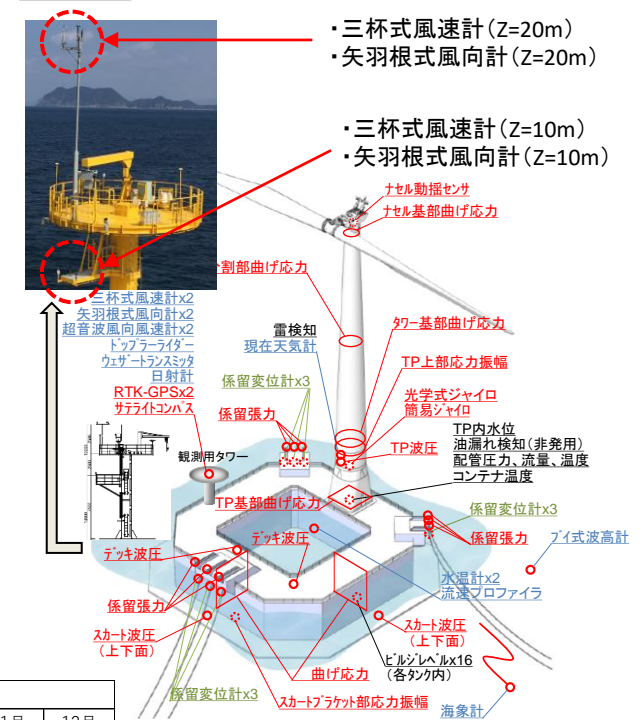
月別平均風速@観測タワー



月別最大風速@観測タワー

月別平均風速は年毎のバラツキはあるが、全体的な傾向は一致

観測タワー



※10分間で平均化処理

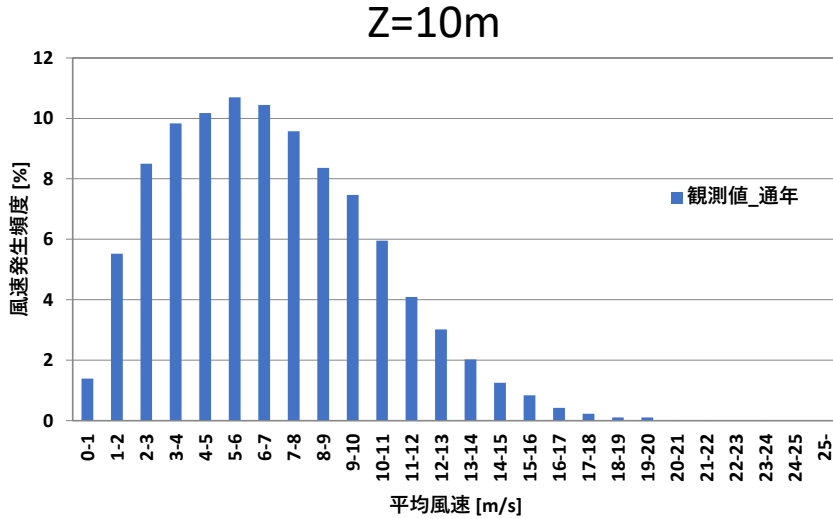
項目	2018年			2019年											
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最大風速(Z=20m) [m/s]	16.4	14.7	19.2	18.1	18.7	21.9	20.9	20.9	16.4	18.2	19.3	22.8	21.2	16.6	17.7
最大風速(Z=10m) [m/s]	14.6	15.5	16.5	18.9	17.6	19.7	20.6	20.8	16.0	18.3	18.7	21.1	20.7	15.8	17.7
風速データ取得率	32.5%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99.5%	100.0%	99.6%	100.0%	97.6%	98.0%	100.0%	100.0%

項目	2020年												2021年									
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
最大風速(Z=20m) [m/s]	23.1	22.1	20.4	21.6	17.6	16.5	15.0	17.4	24.4	16.0	15.5	21.3	21.0	21.5	17.0	18.3	16.3	18.2	16.5	18.9	23.1	19.8
最大風速(Z=10m) [m/s]	19.5	19.2	19.1	20.2	17.7	16.8	14.3	16.6	23.7	17.0	14.8	19.8	18.5	18.3	18.1	18.3	16.0	18.4	17.2	17.8	21.8	19.5
風速データ取得率	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	93.3%	76.6%	78.5%	93.5%	100.0%	90.3%	98.5%	96.8%	100.0%	100.0%	100.0%	98.3%	55.2%	100.0%

1. 浮体設備の分析・検証

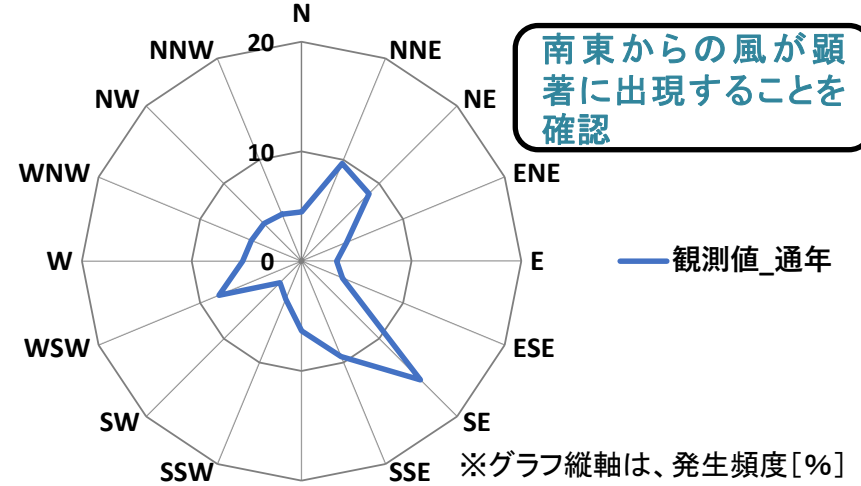
—外部条件の調査—

風速／風向発生頻度(2019-2021年)

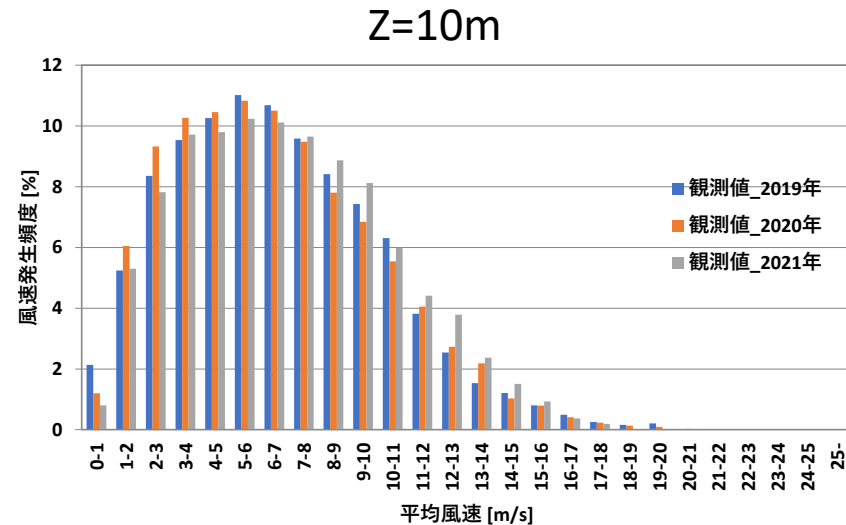


観測値*: 2019年1月1日～2021年12月31日の3年間

*観測値は、観測タワーZ=10mでの風速:三杯式風速計、風向:矢羽根式風速計の値



風速／風向発生頻度(2019, 2020, 2021年の比較)

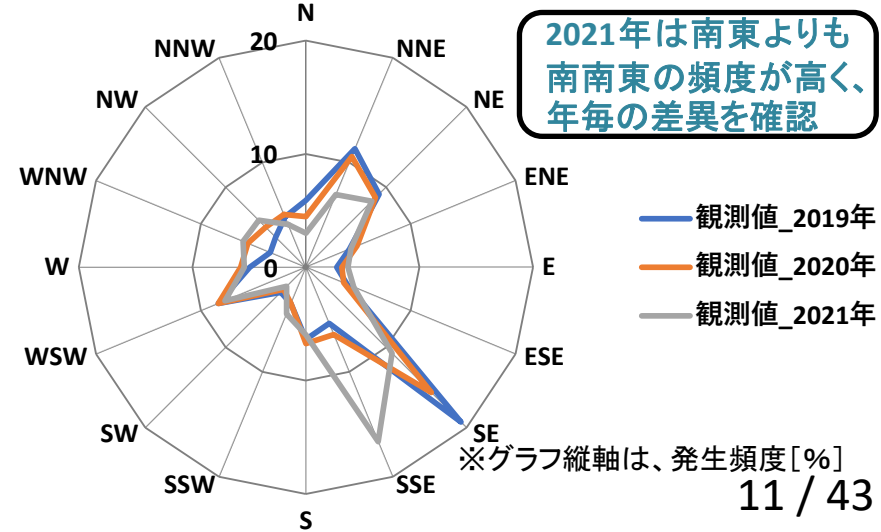


観測値*: 2019年1月1日～2019年12月31日の1年間

2020年1月1日～2020年12月31日の1年間

2021年1月1日～2021年12月31日の1年間

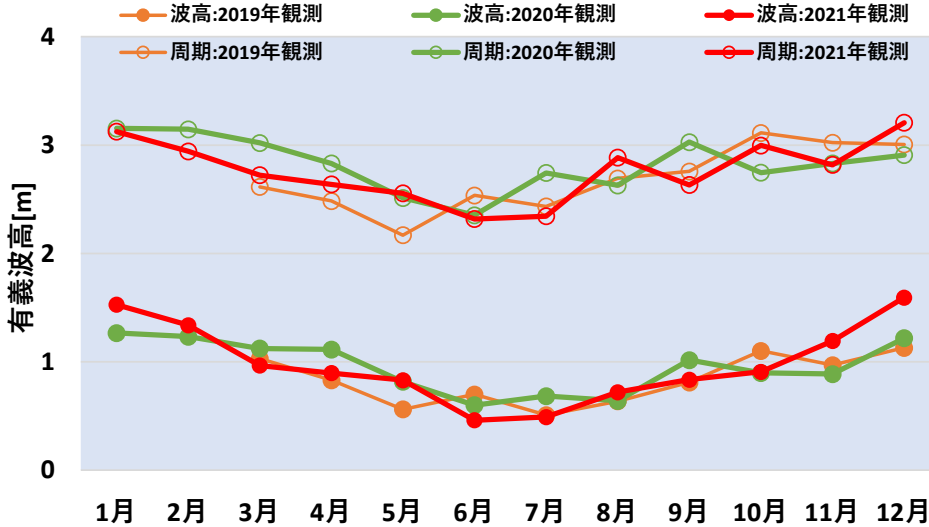
*観測値は、観測タワーZ=10mでの風速:三杯式風速計、風向:矢羽根式風速計の値



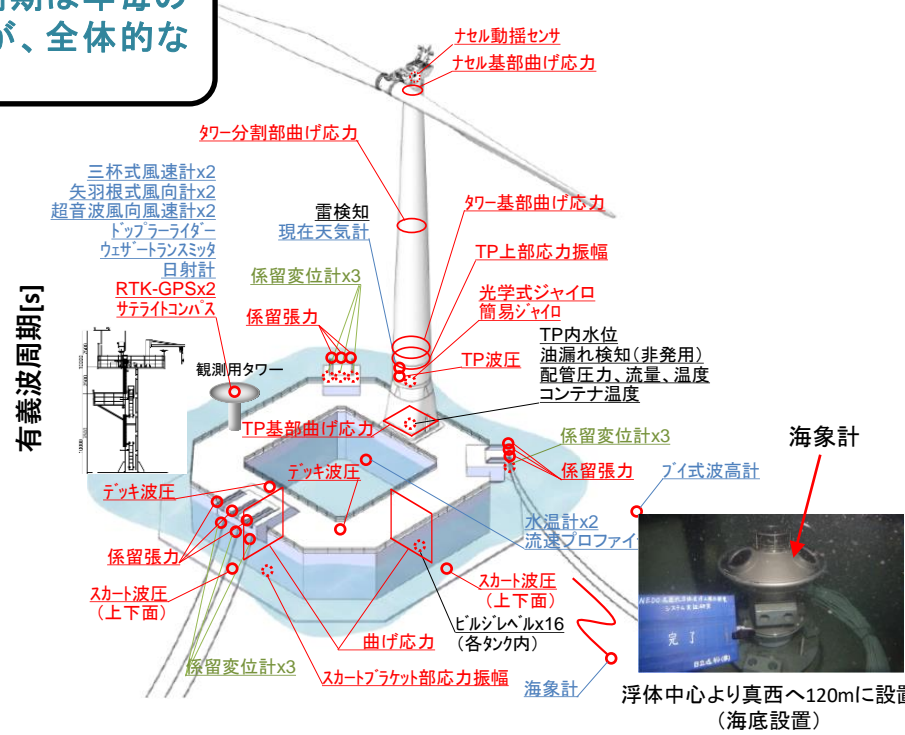
1. 浮体設備の分析・検証 —外部条件の調査—

海象計データ(月別平均波高)

月別平均波高・周期は年毎のバラツキはあるが、全体的な傾向は一致



海象計データ(月別最大波高)



浮体中心より真西へ120mに設置(海底設置)

項目	2019年												2020年											
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
最高波高 [m]	6.12	4.55	3.00	4.60	2.91	3.67	9.72	6.67	5.96	6.82	9.61	8.87	6.66	7.31	6.32	5.06	3.72	3.12	6.31	3.67	4.95	8.73		
有義波	波高 [m]	3.38	2.29	1.75	2.11	1.37	2.01	4.93	3.37	3.15	3.19	4.63	4.58	3.72	3.74	3.07	2.49	1.81	1.62	3.42	2.23	2.66	4.44	
	周期 [s]	7.0	6.5	6.9	6.0	4.7	5.6	9.1	8.2	9.5	7.5	9.0	8.7	7.6	8.1	6.9	6.9	8.3	6.5	8.3	7.8	6.9	8.5	
	波向 [deg/方位]	273 (W)	335 (NNW)	351 (N)	266 (W)	253 (WSW)	284 (WNW)	332 (NNW)	349 (N)	353 (N)	325 (NW)	266 (W)	291 (WNW)	322 (NW)	347 (NNW)	268 (W)	276 (W)	337 (NNW)	292 (WNW)	273 (W)	345 (NNW)	342 (NNW)	309 (NW)	
波浪データ取得率	62.8%	74.7%	77.3%	81.8%	91.5%	88.4%	84.7%	83.3%	95.8%	89.5%	96.6%	95.5%	74.6%	97.6%	75.4%	85.4%	89.9%	88.0%	92.8%	71.1%	89.0%	93.3%		

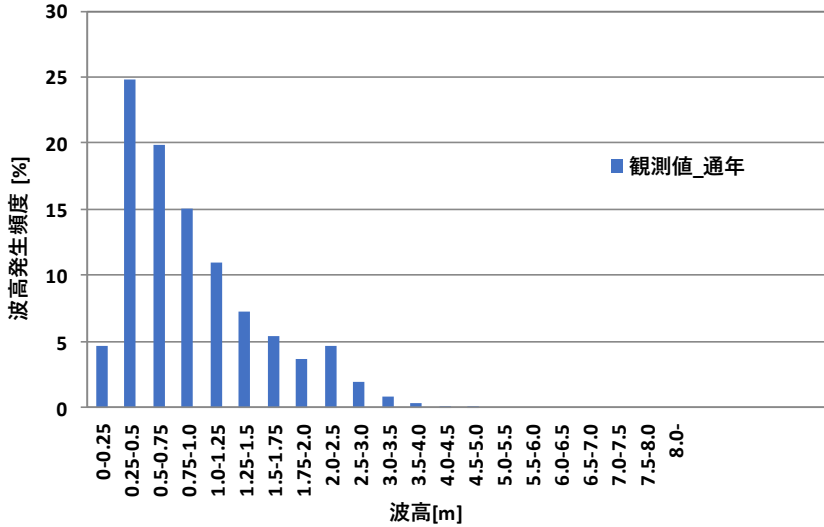
項目	2021年												
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
最高波高 [m]	8.53	8.13	9.24	6.03	5.64	2.86	3.33	5.62	5.92	6.69	6.13	9.08	
有義波	波高 [m]	4.11	4.26	4.64	3.37	2.67	1.33	1.71	3.02	3.06	3.57	4.10	
	周期 [s]	7.83	7.65	9.33	8.65	6.17	7.19	6.85	7.73	7.40	8.71	6.96	7.59
	波向 [deg/方位]	298 (WNW)	293 (WNW)	343 (NNW)	346 (NNW)	300 (WNW)	358 (N)	275 (W)	331 (NNW)	57 (ENE)	341 (NNW)	274 (W)	306 (NW)
波浪データ取得率	94.9%	93.8%	89.9%	87.1%	89.2%	78.8%	82.4%	89.5%	56.0%	83.3%	81.3%	88.6%	

【参考】設計波高(有義波)
 $H_{s50}=9.80\text{m}$ (50年再現)
 $H_{s1}=5.42\text{m}$ (1年再現)

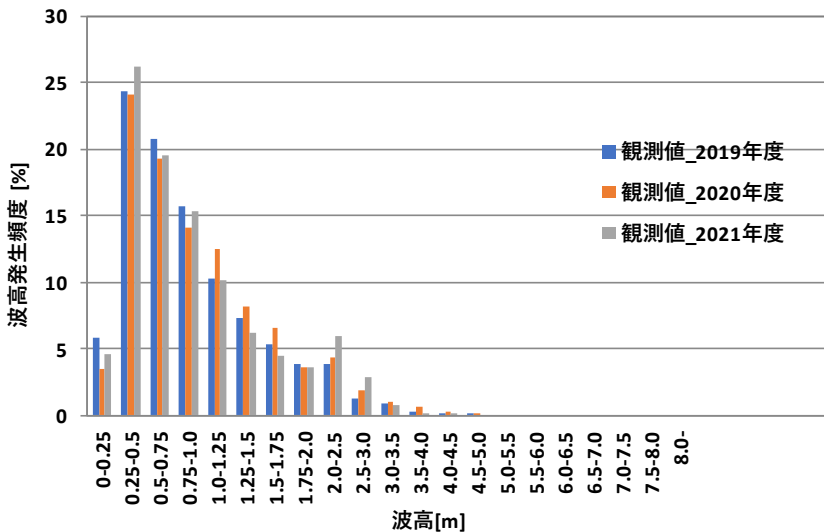
1. 浮体設備の分析・検証

—外部条件の調査—

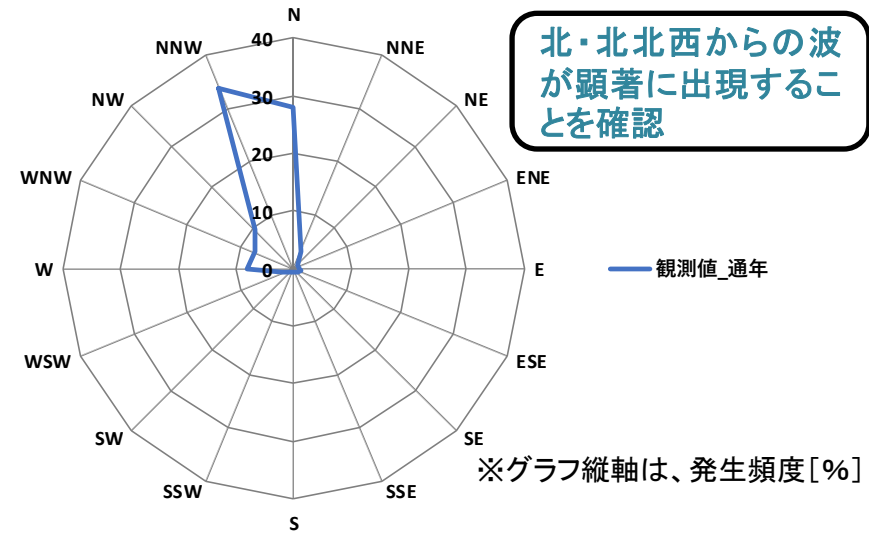
波高／波向発生頻度(2019-2021年度)



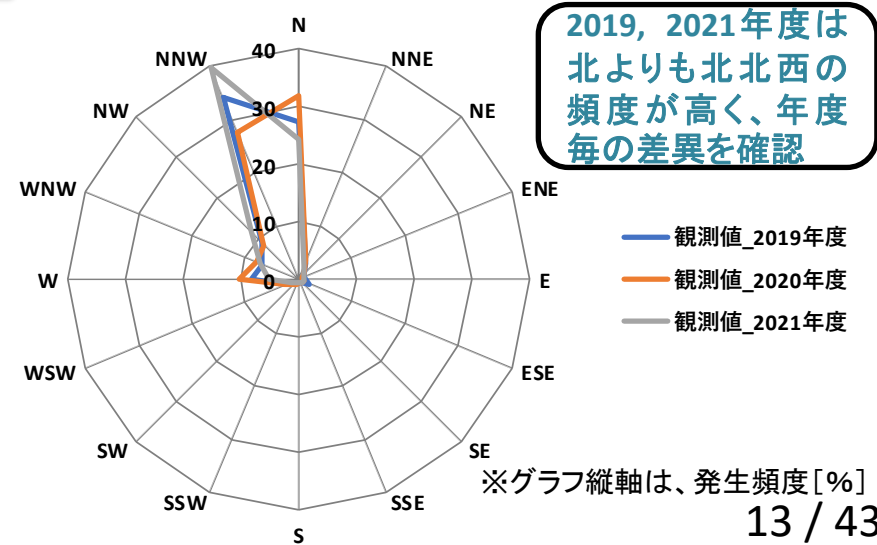
波高／波向発生頻度(2019, 2020, 2021年度の比較)



観測値: 2019年4月1日～2022年3月31日の3年間

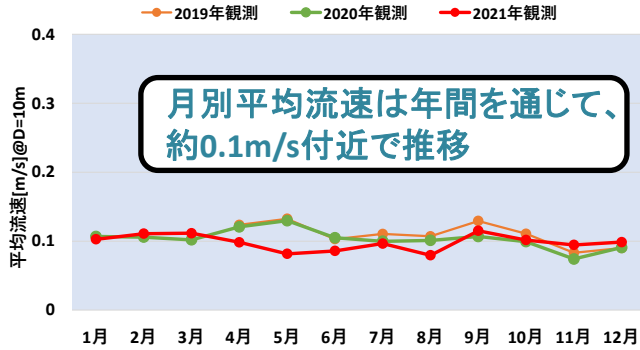


観測値: 2019年4月1日～2020年3月31日の1年間
2020年4月1日～2021年3月31日の1年間
2021年4月1日～2022年3月31日の1年間



1. 浮体設備の分析・検証 —外部条件の調査—

海象計データ(月別平均流速)



海象計データ(月別最大流速)

【参考】設計流速(@表層)
 $V_{50}=1.04\text{m/s}$ (50年再現)
 $V_1=0.86\text{m/s}$ (1年再現)

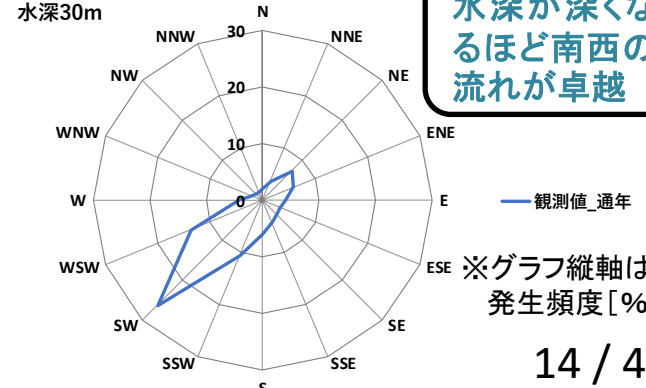
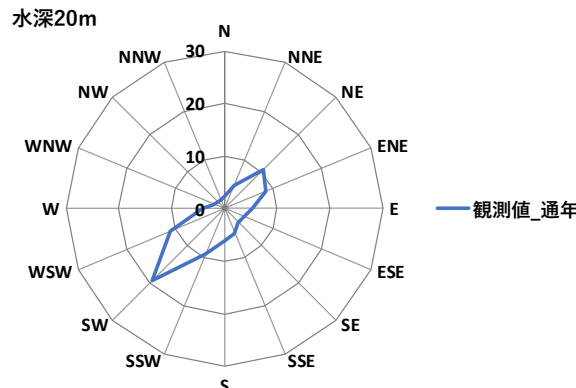
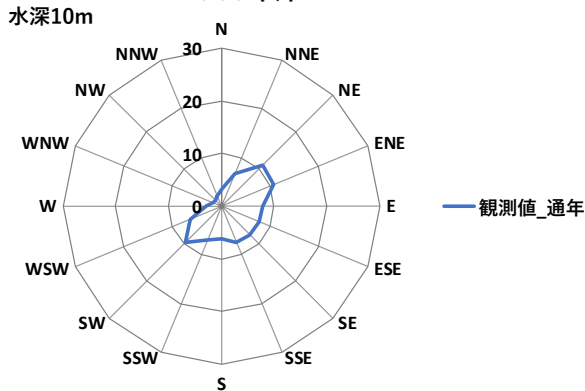
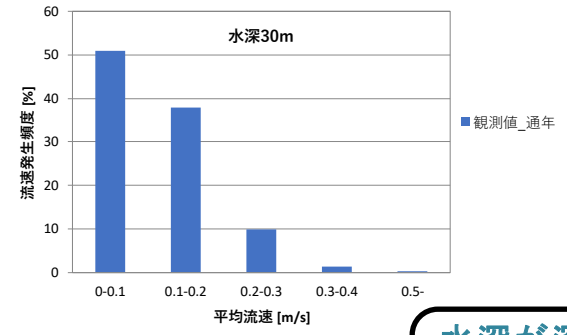
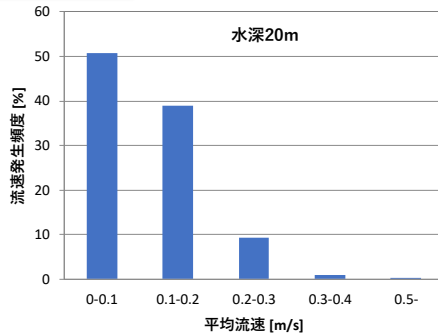
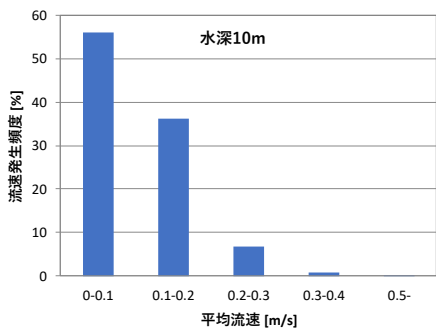
項目	2019年											
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
最大流速(D=10m) [m/s]	0.31	0.41	0.48	0.32	0.32	0.39	0.50	0.37	0.30	0.28		
流速データ取得率	18.1%	83.3%	85.9%	100.0%	96.8%	100.0%	94.6%	80.4%	96.7%	87.1%		

項目	2020年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最大流速(D=10m) [m/s]	0.43	0.40	0.32	0.31	0.40	0.36	0.34	0.31	0.38	0.37	0.34	0.33
流速データ取得率	100.0%	100.0%	80.0%	100.0%	86.8%	100.0%	100.0%	100.0%	95.7%	100.0%	96.6%	99.7%

項目	2021年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最大流速(D=10m) [m/s]	0.42	0.31	0.39	0.34	0.27	0.33	0.35	0.23	0.40	0.25	0.30	0.30
流速データ取得率	100.0%	89.2%	100.0%	96.8%	100.0%	100.0%	100.0%	99.9%	99.4%	100.0%	100.0%	99.9%

流速・流向発生頻度(2019-2021年度)

観測値 : 2019年4月1日～2022年3月31日の3年間



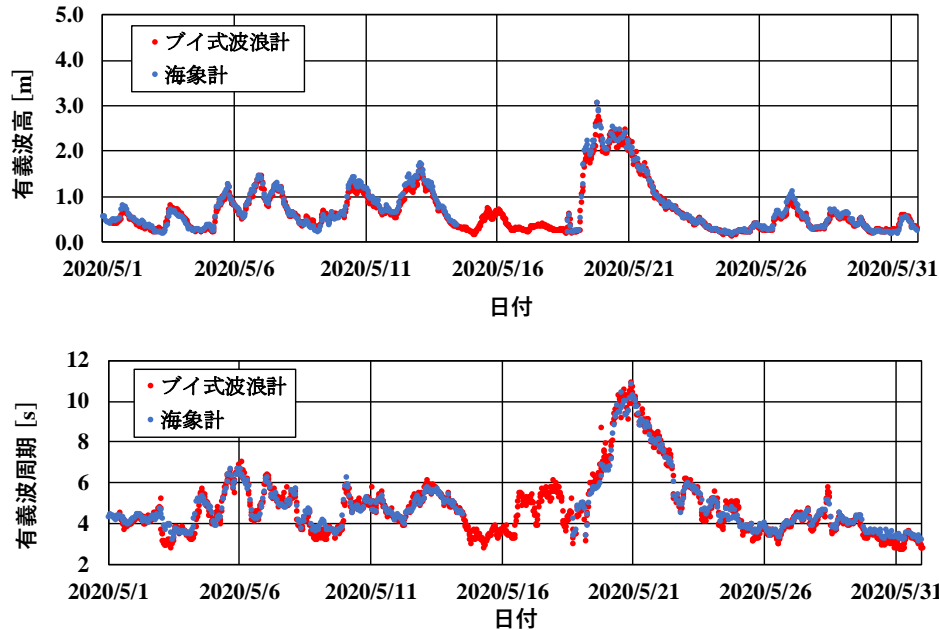
水深が深くなるほど南西の流れが卓越

※グラフ縦軸は、発生頻度[%]

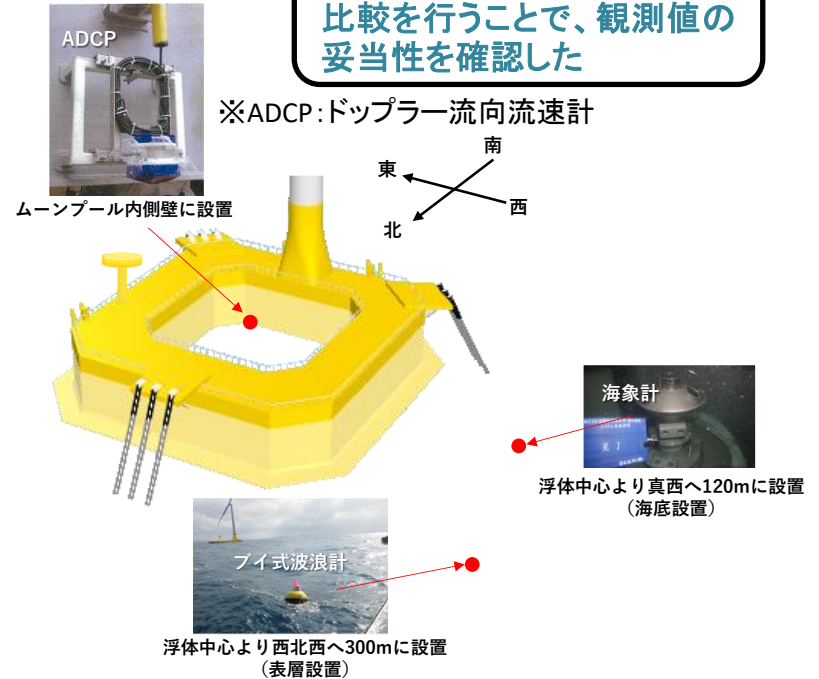
1. 浮体設備の分析・検証 —外部条件の調査—

有義波高・有義波周期(海象計とブイ式波浪計の比較)

比較期間: 2020年5月1日～2020年5月31日の1ヶ月間

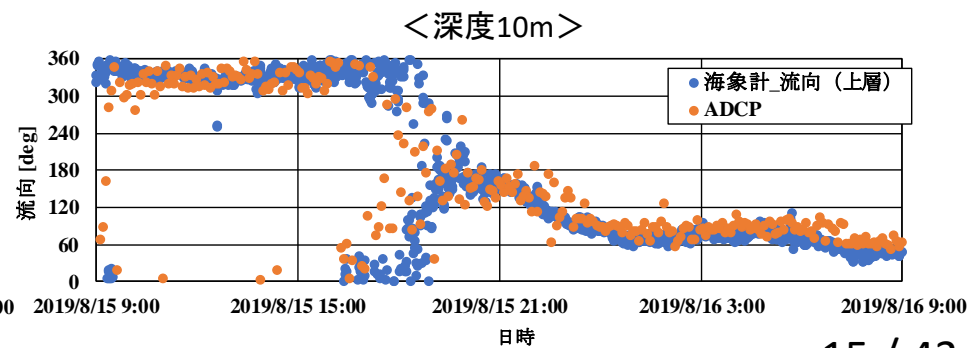
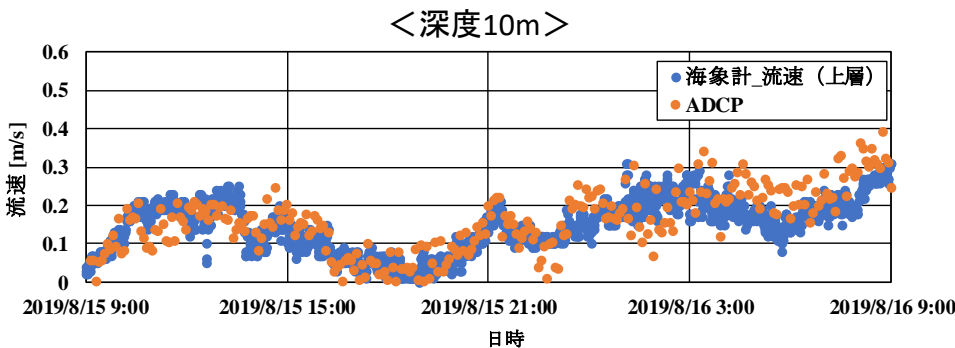


異なる計測機器で観測値の比較を行うことで、観測値の妥当性を確認した



流速・流向発生頻度(海象計とADCPの比較)

比較期間: 2019年8月15日9時～2019年8月16日9時の1日間



1. 浮体設備の分析・検証 —設計手法の検証—

【成果】

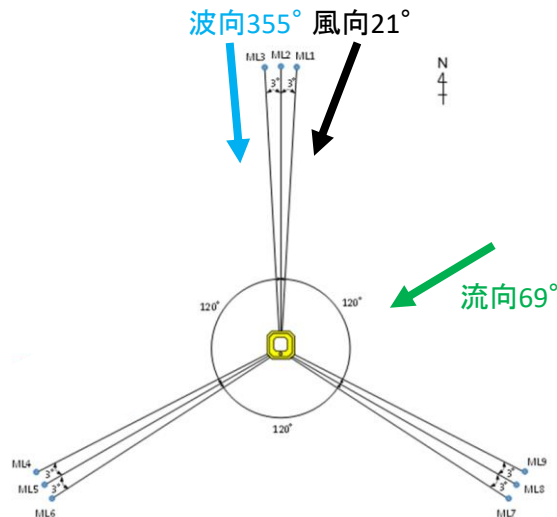
- 比較的単純な外部条件(風・波向き共に北)のケースを抽出し、数値解析を行い、南北方向への浮体傾斜(Pitch)、タワー基部モーメントの観測値と計算値が一致することを確認した。
- さらに、多方向波を考慮した数値解析を行い、水平変位と係留索間の張力分担を観測値と比較した。

観測値と計算値(Bladedによる数値解析)の比較

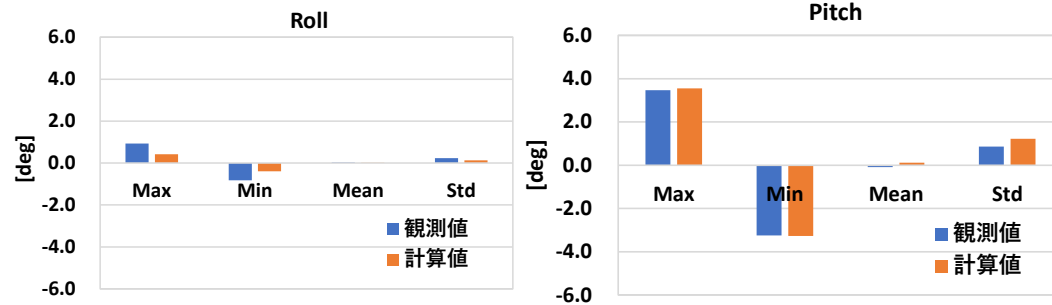
■ 気象海象

日時	2019年10月12日 8-9時
平均風速(@Z=72m)	21.0 m/s
有義波高(最高波高)	3.10 m(5.34 m)
有義波周期	7.5 sec
流速	0.19 m/s

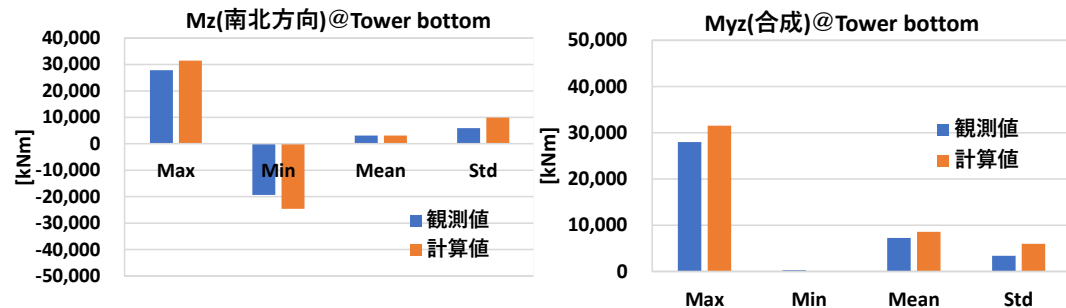
※解析では長波頂波として入力



<浮体動揺の比較>



<タワー基部曲げモーメントの比較>



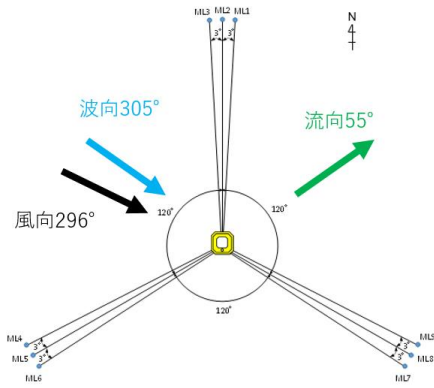
波・風ともにほぼ真北から来るケースについて、
計算値と観測値は概ね一致しており、いずれも
設計の最大値以内に収まっていることを確認

1. 浮体設備の分析・検証 —設計手法の検証—

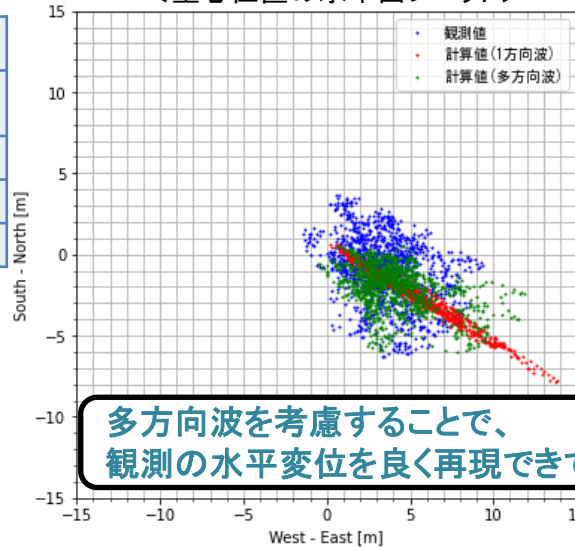
暴風時における観測値と計算値 (OrcaFlex、1方向波と多方向波) の比較

＜気象海象＞

日時	2020年12月3015:30~15:50
平均風速(@Z=10m)	16.2 m/s
有義波高	4.3 m
有義波周期	8.0 s
流速	0.19 m/s

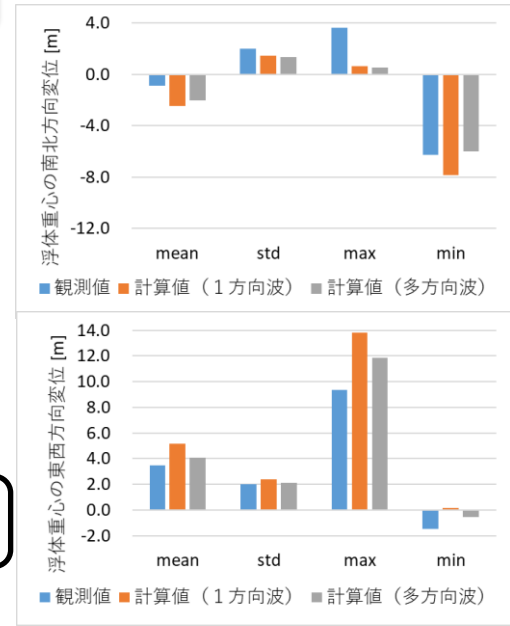


＜重心位置の水平面プロット＞



多方向波を考慮することで、
観測の水平変位を良く再現できている

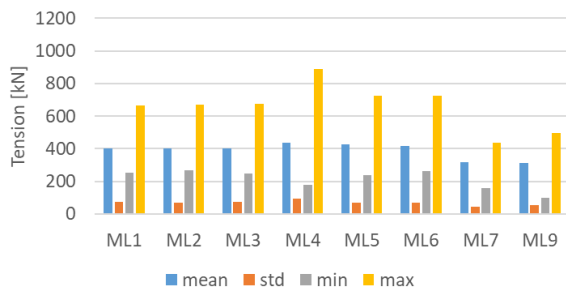
＜水平変位の統計値比較＞



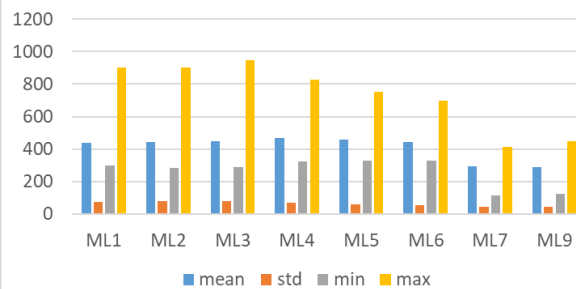
＜係留張力の統計値比較＞

多方向波を考慮することで、
係留索間の張力分担が観測値に近づく

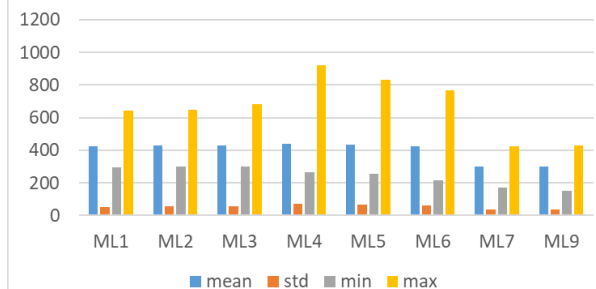
観測値



計算値 (1方向波)



計算値 (多方向波)



2. 観測システムの構築と運用

【実証事業を通じた成果】

- 観測データのデータサーバとネットワークシステムを構築・運用し、常時連続データの収集・蓄積と保存、コンソーシアム各社へ解析データ配信を実施した。
- 浮体式洋上風車に設置した三杯式風速計と矢羽式風向計、超音波風速計、鉛直ライダーによる風況観測とブイ式波高計による海象データを継続して取得した。
- 風車の影響を受けないサイトの観測データとして、ひびき灘近くの藍島にて1年間以上観測データを取得した。
- ひびき灘と藍島の観測について、サイトの風況の特徴(風向および風速の頻度, 風速のべき乗則)を明らかにした。
- ひびき灘と藍島の観測について、風向・風速・時間遅れなどを考慮した相関関係の解析を進め、風車設置点での風況、海域全体の風況の特徴を明らかにした。

2. 観測システムの構築と運用 —ネットワークの構築—

・データサーバとネットワークシステムの運用

観測データの常時連続の収集・蓄積・保存を行い、コンソーシアム各社へデータを配信した。

・データ蓄積と統計解析

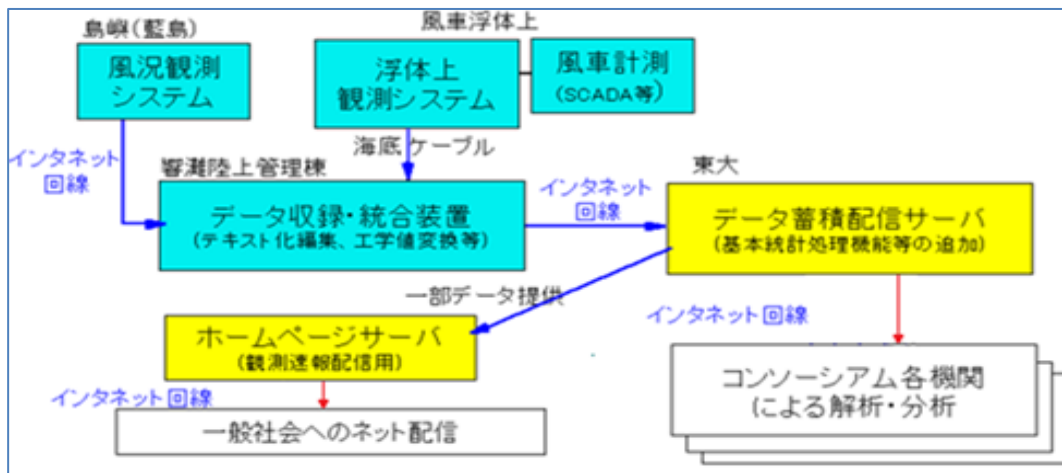
浮体上・風車・藍島の風況観測データを蓄積し、統計解析の一次処理を行い配信した。

・長期間観測機器を使用する課題

2年間継続した観測データの収集、データサーバとネットワークの運用から、海上における長期観測に伴う機器の故障・メンテナンス情報を収集し、課題を明らかにすることができた。

・波浪ブイ

係留システムへの生物付着が顕著にみられたが、問題なく2年間運用することができた。波浪ブイのイリジウム衛星による常時遠隔監視システムを2年間運用し、荒天時も含めて漂流のないことを監視することができた。今後の同様の監視に役立つ知見を得られた。



波浪ブイ漂流監視システム

2. 観測システムの構築と運用 -風況観測の実施と解析-

・浮体上の観測

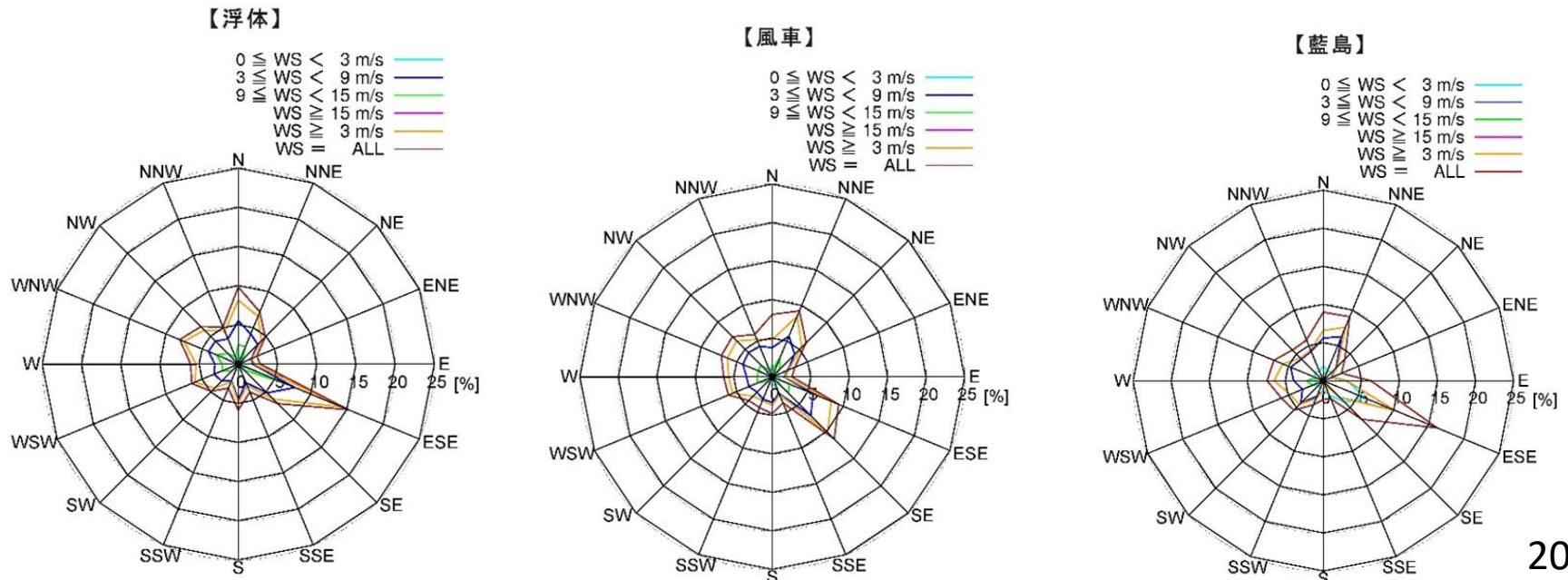
浮体上で三杯式風速計と矢羽式風向計、超音波風速計、鉛直ライダーにより風況観測を行い、風車設置位置での風の特性を明らかにした。

・藍島(気象観測地点)における観測

風車から南東10kmの藍島に設置した三杯式風速計と矢羽式風向計、超音波風速計、鉛直ライダーによる風況観測と風車上の風況観測結果の相関を見ることで、響灘海域における風の特性を明らかにした。



浮体上・風車・藍島の風配図の一例
 (2019年12月1日~2021年1月31日)



2. 観測システムの構築と運用

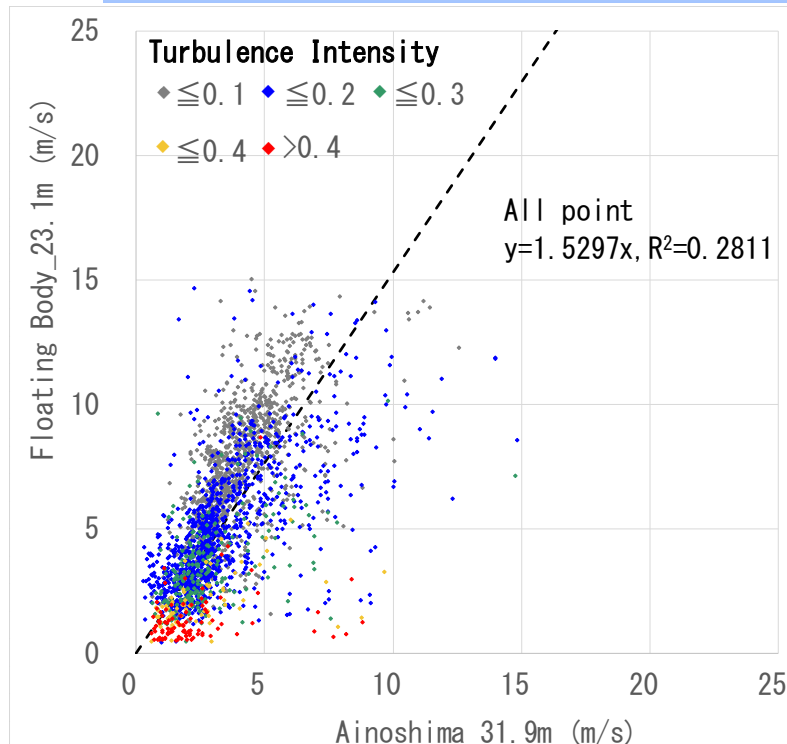
—風況観測の実施と解析—

・浮体上観測と藍島における観測の相関

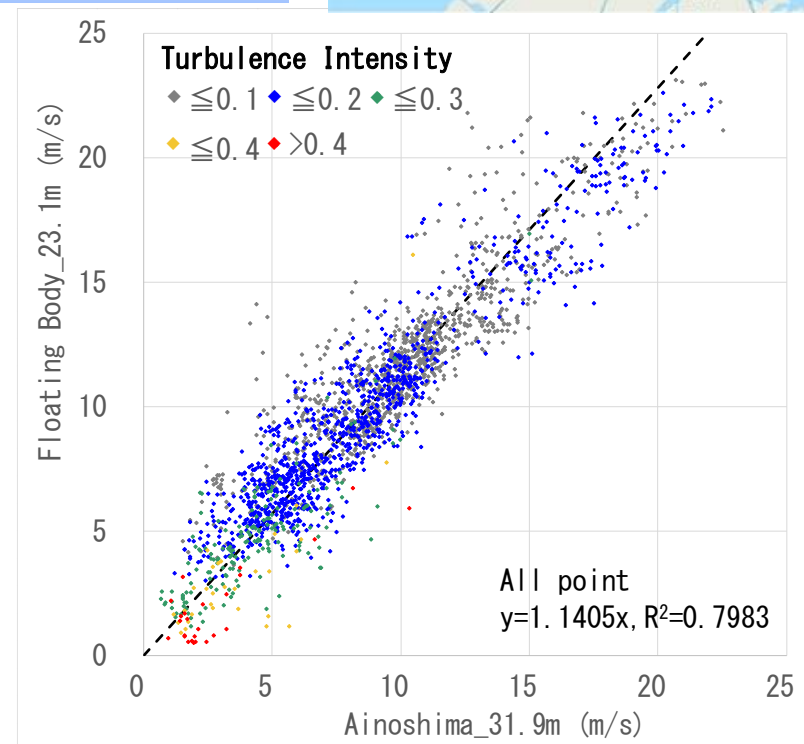
- 風向・風速・時間遅れなどを考慮した風速の相関を調べた。
- 西から北にかけての開けた海域方向から来る風、高風速の風の場合に相関が高くなることが明らかになった。



浮体・藍島の乱流強度別風速散布図の一例



(風向S・2019年12月1日~2021年1月31日)



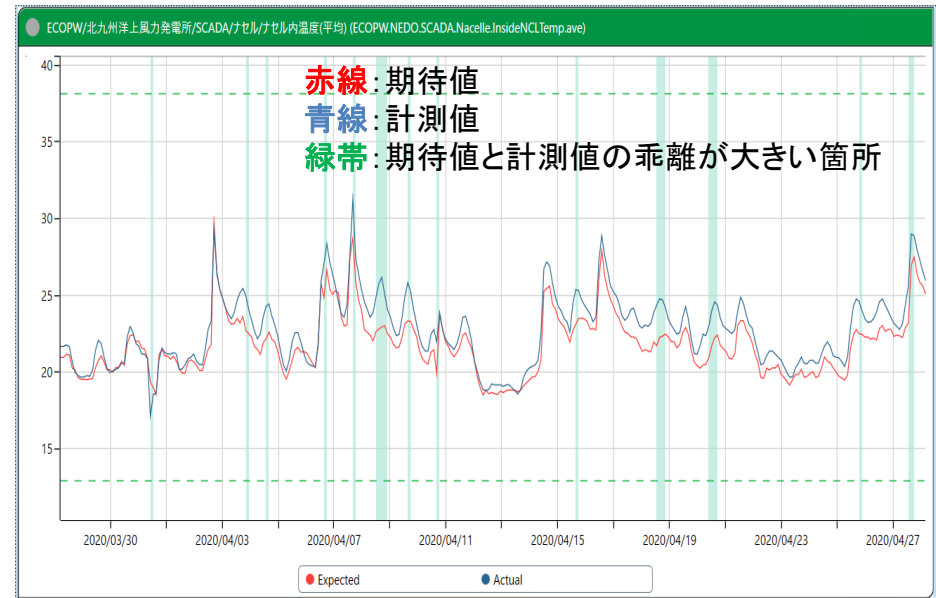
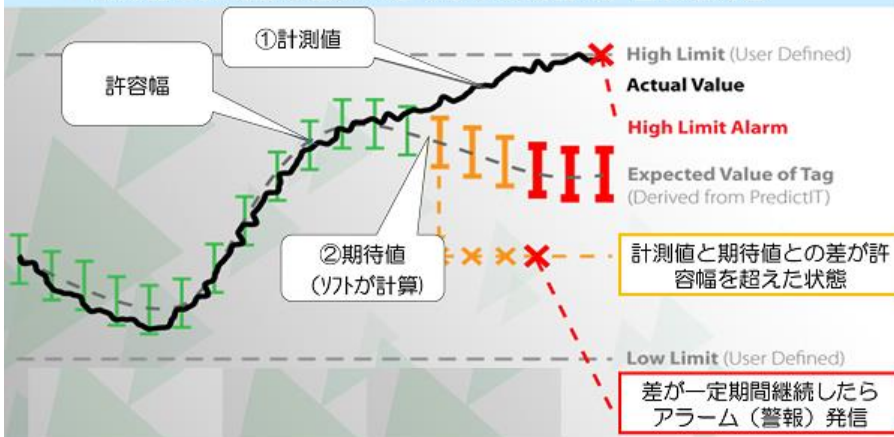
(風向WNW・2019年12月1日~2021年1月31日)

3. 保守管理技術—一次世代洋上風車の保守管理技術の開発—

【故障予知診断システムによる成果】

- 蓄積されたSCADAデータならびに気象・海象情報のデータを用いて、通常運転状態の故障予知診断モデルを作成
- 通常運転状態の故障予知診断モデルを複数個作成し、故障予知診断モデルが示す異常と実際のイベントとの突合せ確認
- 2020年9月台風による不具合、2021年6月ブレードピッチ不具合の故障に関して、精査の結果、故障予知ができていることを確認

- 過去のデータを利用し、設備の正常状態を学習しモデル化
- モデルにもとづき、各計測項目の”期待値”を計算
- 期待値と計測値の差が大きくなった場合に、警報を発信



計測値と期待値の比較

伊藤忠テクノソリューションズ(以下CTC) HP 『異常予兆・故障予知のイメージ』より抜粋 (https://www.ctc-g.co.jp/solutions/predict_it/)

3. 保守管理技術 —ROVによるダイナミックケーブルの維持管理—

【成果】

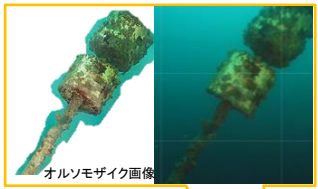
- ROVを用いた浮体、チェーン、ダイナミックケーブルの維持管理(外観確認、深度計測、付着生物厚さの計測、付着生物除去)を行い、健全性を確認した。
- ROVによるケーブル維持管理の有効性を確認し、将来の点検ツールとしての適用可能性を確認した。
- ROVの画像から付着生物の厚さを推定し、推移を整理した。

外観確認、深度計測、付着生物の厚さ測定

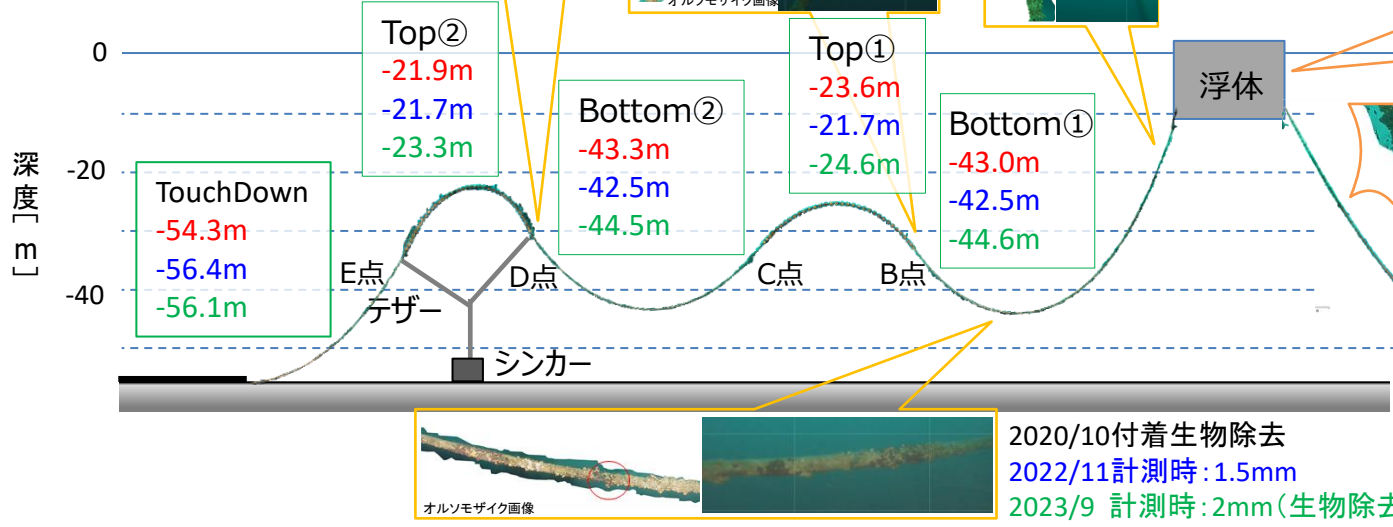
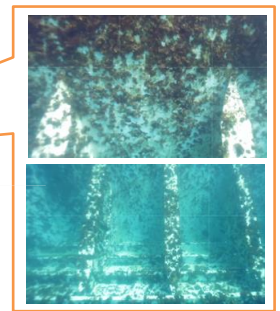
2020/10付着生物除去
2022/11計測時: 36mm
2023/9 計測時: 38mm(生物除去から3年後)

ケーブル深度計測日
赤字: 2022/7/25
青字: 2022/11/9
緑字: 2023/9/29

2020/10付着生物除去
2022/11計測時: 22.0mm
2023/9 計測時: 27.5mm
(生物除去から3年後)



2021/8付着生物除去
2022/11計測時: 37.5mm
2023/9 計測時: 74.5mm
(生物除去から2年後)



2020/10付着生物除去
2022/11計測時: 1.5mm
2023/9 計測時: 2mm(生物除去から3年後)

オルソモザイク画像

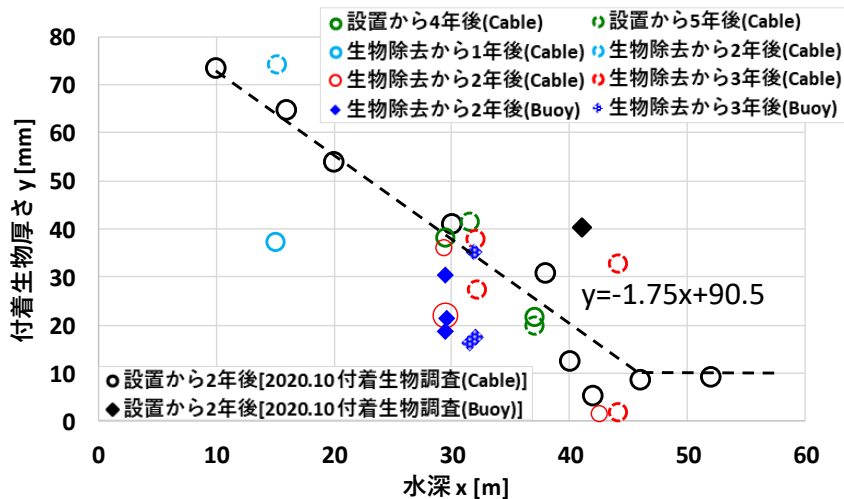
外観確認: 付着生物上から確認する限り、ケーブルの損傷等は確認されなかった。
 深度計測: 2022/11/9から2023/9/29の間にケーブル深度は平均1.8m沈下したが、着底は無かった。
 厚さ測定: ROVの映像から各箇所における付着生物厚さを確認した。

3. 保守管理技術 —ROVによるダイナミックケーブルの維持管理—

付着生物厚さの比較



計測箇所		経過時間	付着生物厚さ	
			2022年(設置後2年の結果との比較)	2023年(前年の結果との比較)
Cable	放出点付近	除去後1, 2年	小さい	大幅に増加
	Bottom①	除去後2, 3年	ほぼ同等	変化は小さい※1
	B点, D点	除去後2, 3年	ほぼ同等または小さい	変化は小さい
	C点, E点	設置後4, 5年	ほぼ同等	変化は小さい
Buoy	B点, C点, D点	除去後2, 3年	ほぼ同等または小さい	変化は小さい



※1 2022年の時点で幼生の付着が確認された箇所の付着生物厚さは増加した

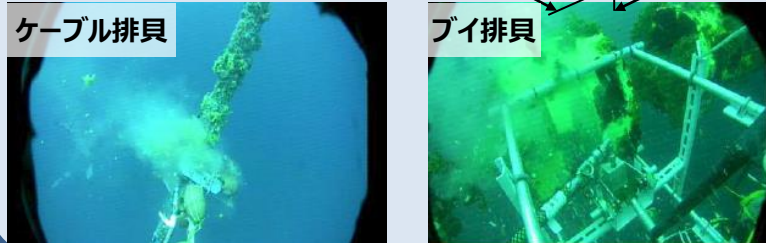
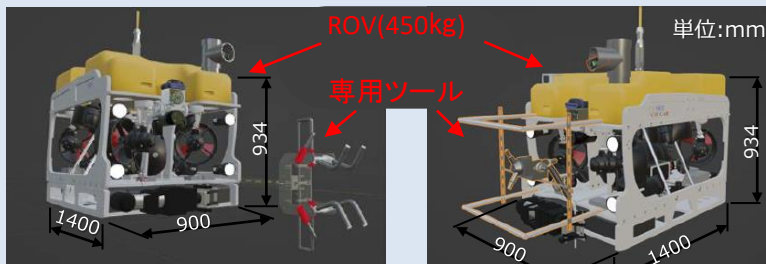
水深と付着生物厚さの関係

※近似式は付着生物調査結果(設置から2年後)より設定

付着生物除去

2022年度

2023年度



水深と付着生物厚さの関係についてのデータを蓄積し、傾向を確認した。

➡ 2022年度 大型ROVでの排貝効率の向上を実現した。(ケーブル:1.75分/m、ブイ:3.0分/個)


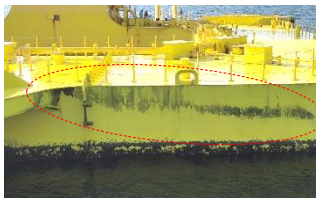



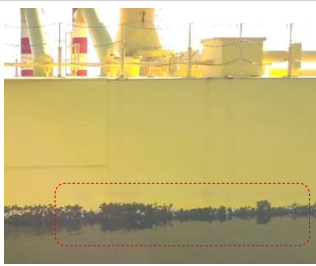
2023年度 小型軽量ROVで排貝を試み、ツール装着状態での遊泳性と操作性を確認した。

3. 保守管理技術 —ドローンによる浮体気中部の外観点検—

【成果】

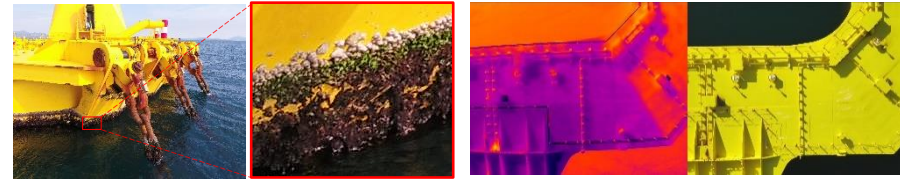
- 外観点検におけるドローンの有用性を確認し、3Dデータ生成に向けて改善を施した。

2022年度と2023年度の比較及び3Dデータ生成

実施時期	2022年10月21日	2023年10月31日
寸法[mm]	883 × 886 × 427	347.5 × 283 × 107.7
重量[kg]	4.91	0.92
最大風圧抵抗[m/s]	12	12
最大飛行時間[min]	33	45
カメラ(動画/静止画)	4K/2080万画素	4K/1200万画素
浮体外周に黒ずみがみられる		
浮体上面が白くなっている		
ムーンプール東側の排貝(2021/6/7)跡に付着生物が増加		

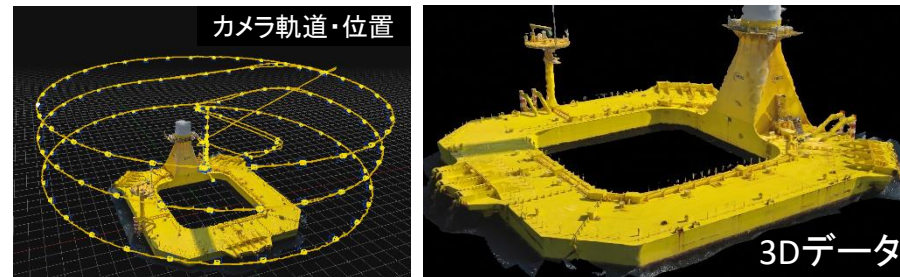
有用性

- 目視点検の効率化(浮体の全景、海面付近の外観やブレードを近距離で撮影可能)
- 赤外線カメラでの撮影により、温度異常の有無、浮体内部構造やブレードの状態等の確認が可能



改善点

- 小型軽量ドローンを複数機使用することで、点検の中断回数、時間を削減
- 自動飛行撮影により、操縦者の技術に依存しない画像取得に成功



取得画像から作成した3Dデータの精度を改善した。

4. 風車, 係留索の維持管理

一 設備利用率の向上検討一

- 設備利用率改善に向けたデータ分析を行った (右表) .
- 固定カメラによるブレード外観点検にAI画像解析での損傷確認が可能であり, 点検作業の効率化が図れた.

分析期間	平均風速	最大可能な設備利用率*	設備利用率実績
'19/7~'20/2	7.6m/s	37.2%	25%
'22/7~'23/9	7.3m/s	34.7%	23%

*最大可能な設備利用率: 平均風速とレイリー分布から風力発電機のパワーカーブをもとに試算した, 理想の発電端グロス値. 空気密度やヨー・ミスアラインメント等による利用率低下は考慮せず.

□ 実施項目

- 1) 商用化運転を想定した連続運転での設備利用率の確認
- 2) 風況観測データ, 海象データの整備・解析
- 3) 保守管理技術の向上

- 各施策を実施した結果, 要因No.1~3による利用率低下量は、**いずれも改善**。
- 要因No.4の加速度0.3G超による停止に関する大幅改善は、**台風等接近・通過時の事前・事後停止実施 ('21年5月からの対策) 等によるものと推測**。
- しながら、**平均風速低下 (7.6m/s→7.3m/s)** のため、設備利用率実績は25%から23%に低下。

□ 設備利用率改善に向けた施策

No.	要因	対策案・実施時期	利用率低下量** ('19/7~'20/2実績)	利用率低下量** ('22/7~'23/9実績)
1	故障・不具合	故障率低減及び復旧時間短縮対策 対策: 実証中及び商用化時	4.5%	3.5%
2	定期点検等	タイミングの最適化と短時間化手法 対策: 実証中	0.7%	0.4%
3	浮体近接・上船時の風車停止	必要最小限化への見直し 対策: 実証中	0.8%	0.4%
4	浮体動揺による加速度0.3G超で風車停止	加速度大による停止実態の相関データの蓄積及び、出力制限策の検討 商用化時: 大型浮体の場合は固有周期が長周期へシフトすることで回避	約2%	0.1%
5	欧州と日本の空気密度差及び高温によるPower Reduction	日本・アジア等低風速・低空気密度域向け風車採用 対策: 商用化時	約5% (推測値)	約5% (推測値)
6	九州電力による出力制限	出力制限時に保守管理を実施する等, 臨機応変な体制準備 対策: 実証中	2.5% (参考値: '21年時間発生率実績)	0.7%

**利用率低下量: 停止時間における実測風況 (月間平均風速) と風力発電機のパワーカーブをもとに算出した逸失発電量 (Wh) から, 利用率の低下分を概算.

4. 風車, 係留索の維持管理 — 設備利用率の分析 —

・商用機における事業性等を検討に資するため、実際の商用環境での設備利用率がどの程度になるか分析を行った。

【分析の概要】

A) データが揃っており、連続して運転していた2022年7月から2023年9月までの期間について算出。

B) 時間稼働率については、従前どおり、TAベースとOAベースで算出

C) 時間稼働率・設備利用率については、従前どおりに算出したものの他、右表のケースで算出。

D) 停止要求を考慮した利用率を厳密に計算するためには、実際に停止する時の風速も考慮しなければならない。

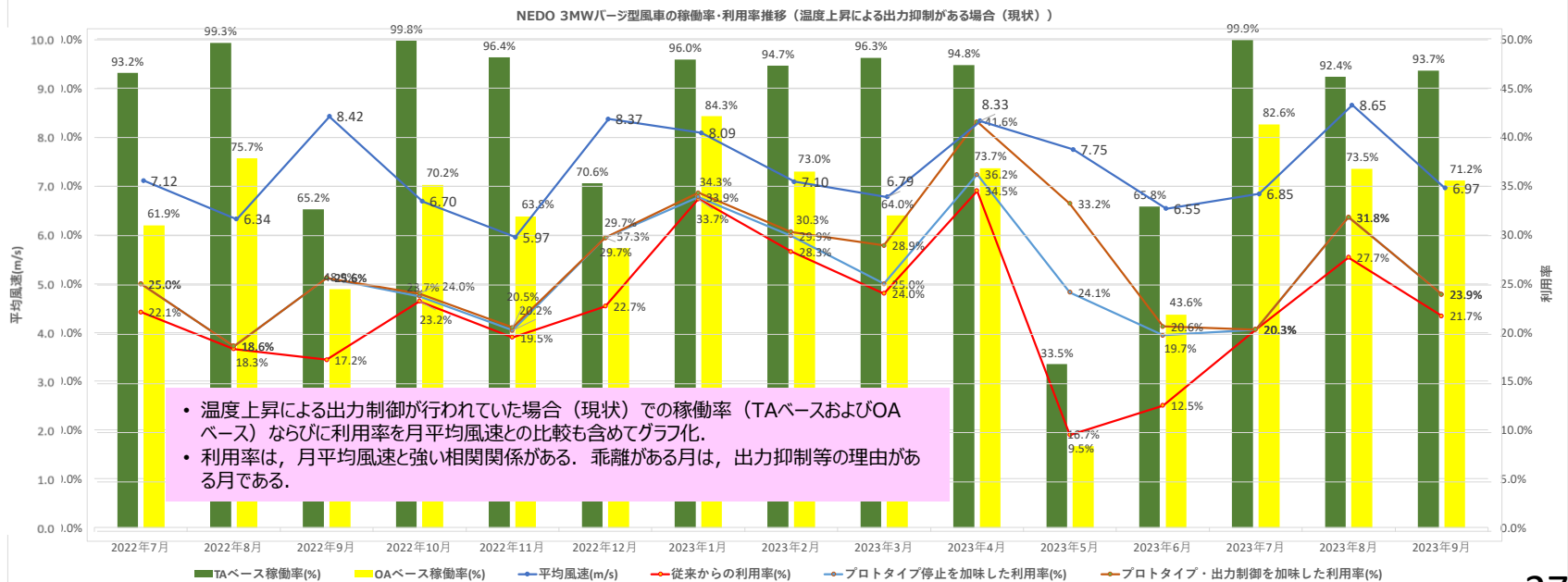
すなわち、停止がなかった場合の発電量を推算し、それを3MW×24h×月の日数で除する必要がある。

しかし、その計算には大変な手間がかかるため、右表に記載した簡易的な算出式を用いた。

この簡易的手法では、設備利用率は若干高めに出ると考えられる。

設備利用率
算出結果
(’22/7~’23/9)

ケースNo.	概要	設備利用率算出結果
①	従来の算出方法 利用率(%) = 各月の発電量 (MWh) / (3MW×24h×その月の日数) (MWh)	22.6%
②	上記①から実証研究による停止時間を除いたケース 概算利用率 (%) = 各月の発電量 (MWh) / (3MW×(24h×その月の日数-実証研究により停止していた時間)) (MWh)	22.9%
③	上記②から更に風車に起因する停止時間を除いたケース ・プロトタイプ風車に起因する故障停止時間を除く ・台風接近時におけるカットアウト風速到達前の停止時間を除く 概算利用率 (%) = 各月の発電量 (MWh) / (3MW×(24h×その月の日数-実証研究および上記理由で停止していた時間)) (MWh)	26.2%
④	上記③から更に電力会社の出力制限要請に伴う停止時間を除いたケース 概算利用率 (%) = 各月の発電量 (MWh) / (3MW×(24h×その月の日数-実証研究・風車起因・出力制限で停止していた時間)) (MWh)	27.9%



4. 風車, 係留索の維持管理 — 設備利用率の分析 —

【概略考察】

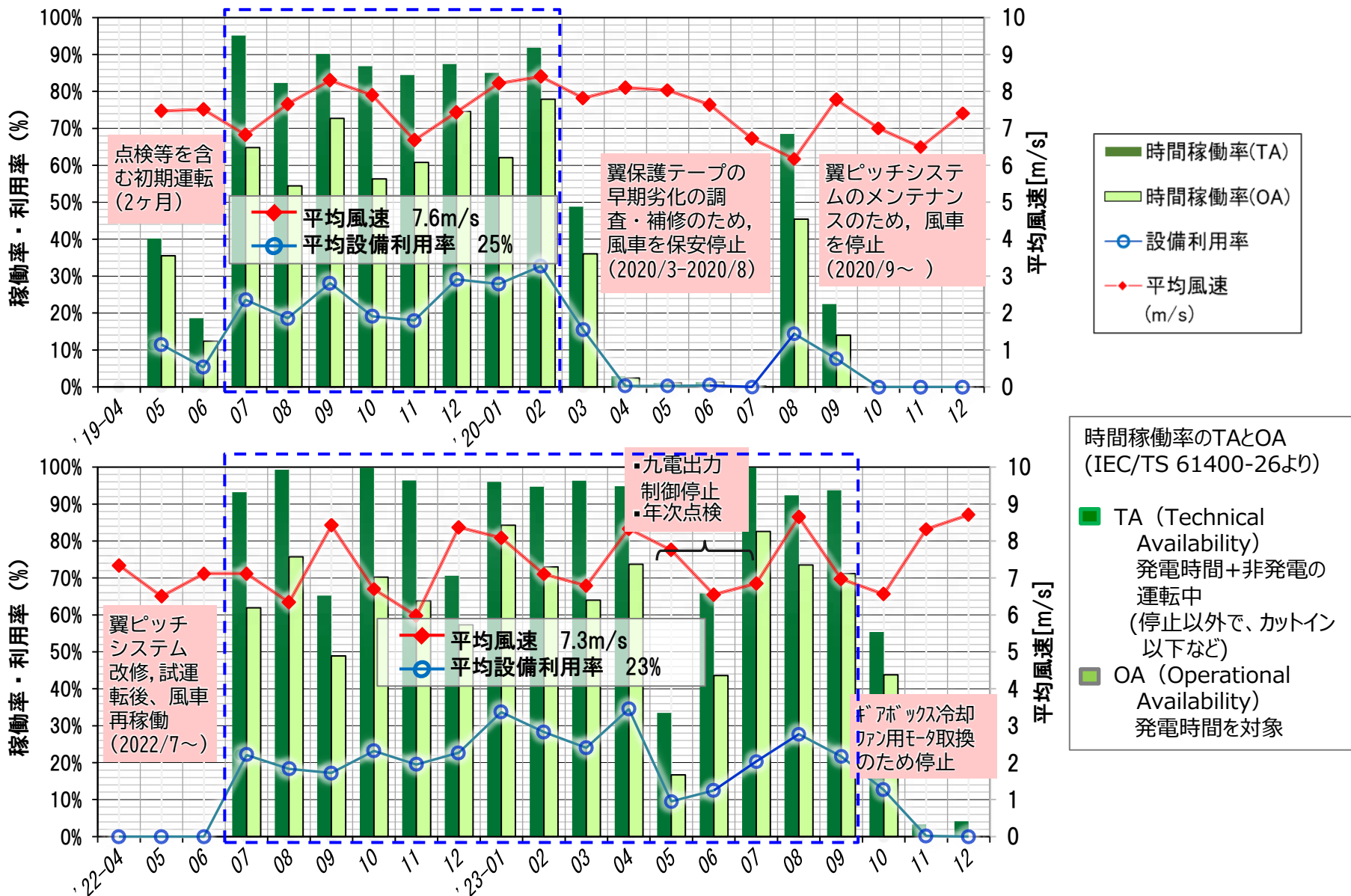
- ✓ 平均風速7.3m/s程度の本海域において, 本風車の場合, 出力曲線等を用いて算出した発電端での理想設備利用率は34.7%であるが, 実測した設備利用率は従来ベースで約23%, 実証研究による停止やプロトタイプ風車起因の停止を除いたとしても26%程度にとどまっている.
- ✓ 本風車は, 欧州の一般的気象条件を想定していると思われ, 日本のような高温の条件では, 発電機巻線温度上昇などにより自動的に出力抑制がかかる. その設備利用率への影響は全体では約0.1%と小さいものの, 夏場では約1%にもなる (2023年8月) .
- ✓ 平均風速が8m/sを超える月には, 30%を超える高い設備利用率が見込める.
特に風車が停止するような事象やトラブルがなければ, 平均風速8.33m/sで設備利用率は42%にも達する (2023年4月) .
- ✓ しかし, 風車への落雷による停止や, 近隣への落雷頻発による事前停止を行った2023年8月は, 平均風速8.65m/sもあったにも関わらず, 設備利用率は約32%にとどまっている.
- ✓ 九州電力による出力制限の設備利用率への影響は年平均で約1.2%であったが, 多い月 (2023年5月) では約9%にも達する.
- ✓ 今回の集計期間では, 部品や装置の偶発故障や, 劣化・摩耗故障等による停止はなかった.



- 十分な事業採算性を得るには30%以上の設備利用率が必要と言われるが, そのためには,
 - ①風車の大型化 (RNA位置が高い) により平均風速を高くする,
 - ②風速8m/s程度以上の海域を選ぶ,
 - ③低風速でも十分な発電量がある低風速域用風車の採用,
 などが必要.
- また, 長時間停止に繋がる設計起因トラブルがない, 実績ある型式認証済みの風車の採用も必要.
- 台風や落雷等による停止時間を短縮する対策や, 日本の気象条件 (気温等) に対応した風車も望まれる.

4. 風車, 係留索の維持管理

一風車運転状況一



4. 風車, 係留索の維持管理

—AI画像によるブレード点検

- ブレード外観点検に固定カメラによるAI画像解析での損傷確認が可能であり、ブレードの維持管理に有効であることを確認した。
- ブレード外観の点検を2ヶ月ピッチで実施した結果、LEプロテクションテープに損傷を発見。

①カメラを設置。ローターアジマス角でNo1.2ブレードの下部側を撮影

②No1.2ブレードのピッチをファインに旋回し撮影

③ローターを180deg反転しNo1.2ブレードの下部側を撮影

④No1.2ブレードのピッチをファインに旋回し撮影

4回の動作でブレード全体を網羅。作業はTP上で実施するためスピーディーで安全。

	AI固定カメラ	ロープワーク
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 短時間で撮影が可能 少人数で作業を行う AI解析のため見落としが少ない 資機材の運搬が容易 風速や浮体の傾きによる影響が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> 損傷度合いの確認が容易 傷の深さや細かいクラックなど確認ができる 応急処置が可能 風速により作業が制限される(10m/s以下)
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> カメラの保有台数が少ないため日程調整が困難 小さい傷は見落としことがある 2枚翼のAI解析データが不足 	<ul style="list-style-type: none"> ロープワーカーの確保が困難 高所作業のため危険度が高い 段取り, 点検に時間を要す 降下時の触れ止めロープや安全靴によりブレードを傷つける
	2時間×1名	8時間×3名

5. 効率的係留技術の確立

—合成繊維ロープ係留とタワーブイ係留の水槽実験による挙動特性評価—

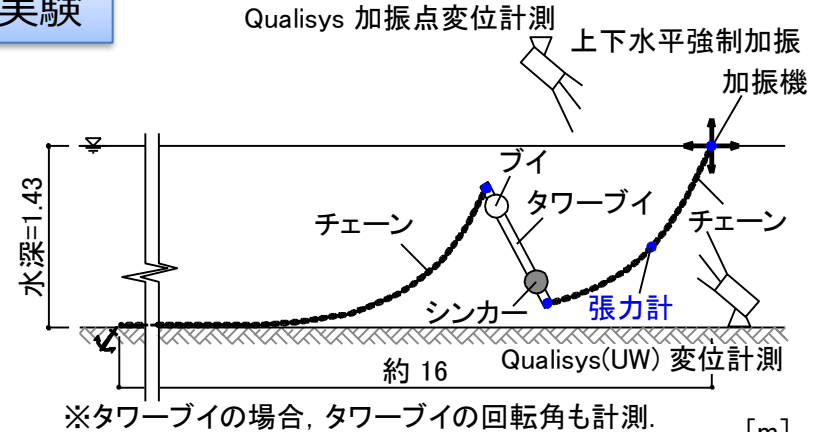
【課題】

- 浅い海域での係留は浮体動揺の影響が大きく、鋼製チェーンによるカテナリー係留では張力変動が大きくなり設計を難しくしている。

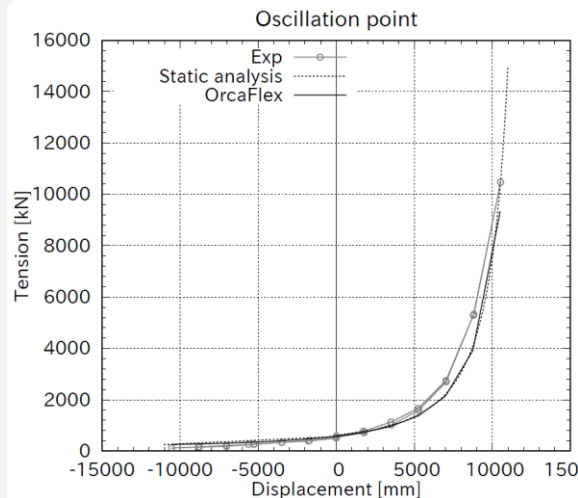
【実証事業を通じた成果】

- 張力変動を低減する方法として、タワーブイを用いた新しい係留システムの提案を行った。
- 浅い海域を模擬した条件下で、合成繊維ロープ係留、タワーブイ係留およびカテナリー係留を用いた模型実験を実施し、係留システムの全体の挙動(静的および動的係留特性)を実験的に明らかにした。
- カテナリー係留、タワーブイ係留の静的特性について、静的な特性解析法を定式化し、水槽実験、OrcaFlexによるシミュレーションと比較してよく一致することを証明した。
- 提案したタワーブイ係留の適用による張力抑制効果の可能性を示した。
- 成果は日本船舶海洋工学会論文集2022年 36巻 p. 41-51に掲載された。

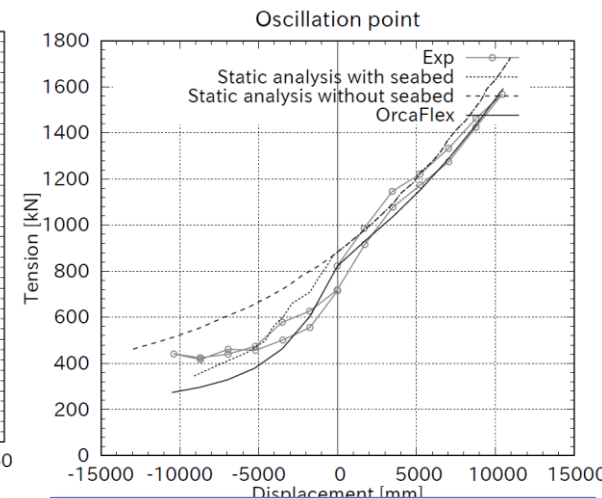
係留系模型実験



水槽実験の概要図(タワーブイのケース)



カテナリー係留の静的張力変位特性



タワーブイ係留の静的張力変位特性

5. 効率的係留技術の確立

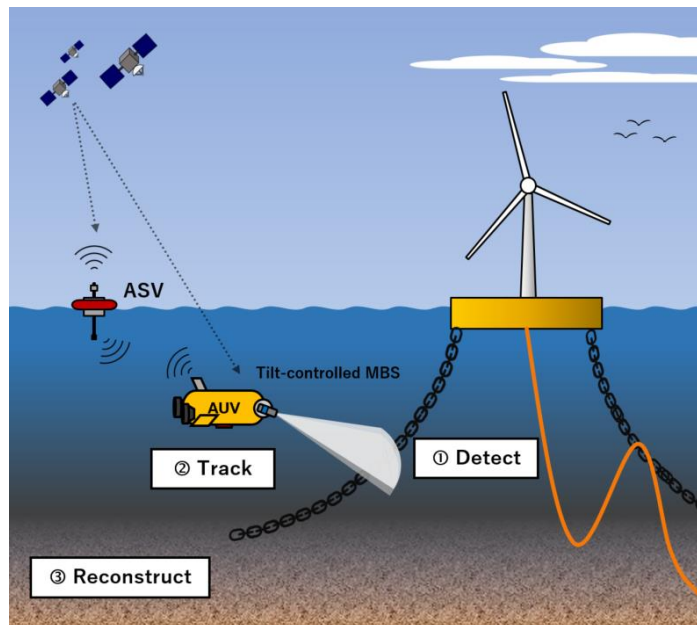
—AUVによる係留索の全体形状および振動範囲を把握する技術の開発—

【目的】

係留索の健全性を効率的に評価するために、ソナーを搭載したAUV(自律型海中ロボット)による全体形状および振動範囲を把握する技術を開発する。

【技術の概要】

上下にスキャンできるマルチビームイメージングソナーにより係留索を探知(①Detect)し、相対位置関係を保ちながら全自動で追従する(②Track)。観測終了後、AUVの位置姿勢データとソナーの計測結果から係留索の全体形状および振動範囲を明らかにする(③Reconstruct)。

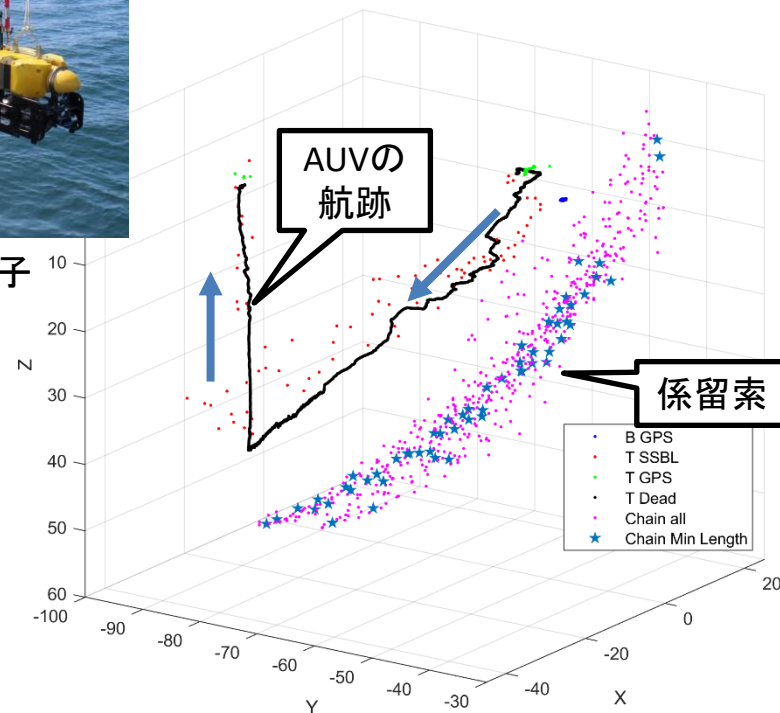


【実証事業を通じた2023年度の成果】

- 2023年9月にバージ型実証機「ひびき」において、東京大学生産技術研究所で開発されたAUV Tri-TONを用いて本技術の実証実験を行った。
- 「ひびき」の係留索に沿ってAUVを全自動で航行させること、また観測結果から係留系の全体形状および振動範囲を取得することに成功した。これにより、本技術の実海域環境条件下における適用可能性を確認した。



AUV投入時の様子



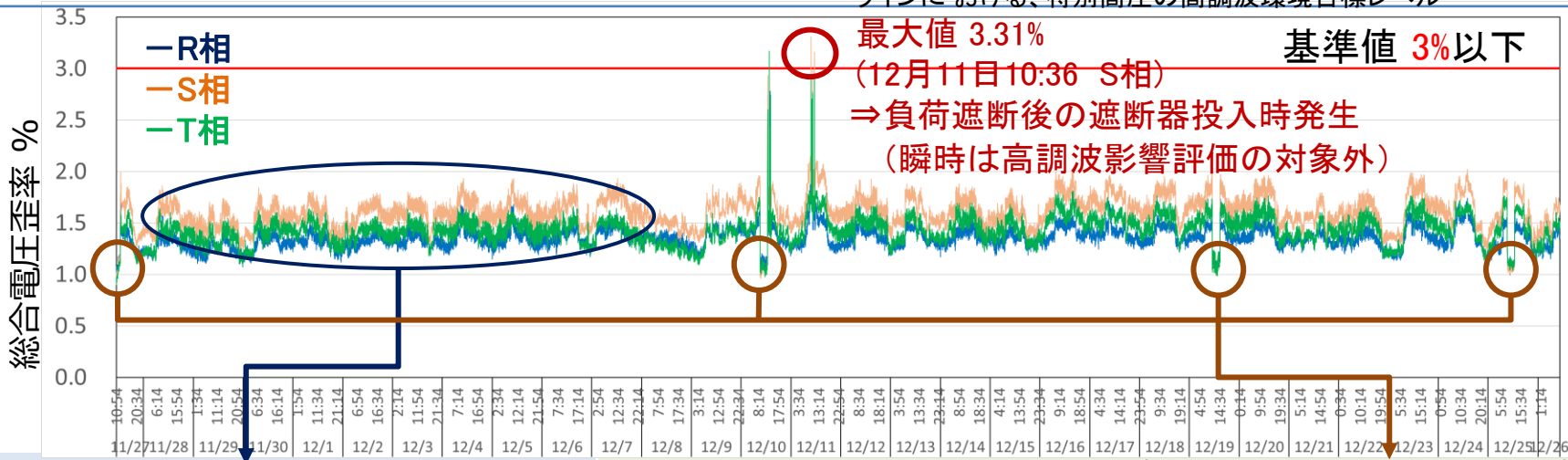
実験結果: AUVの航跡と係留索の全体形状

6. 電力品質の評価

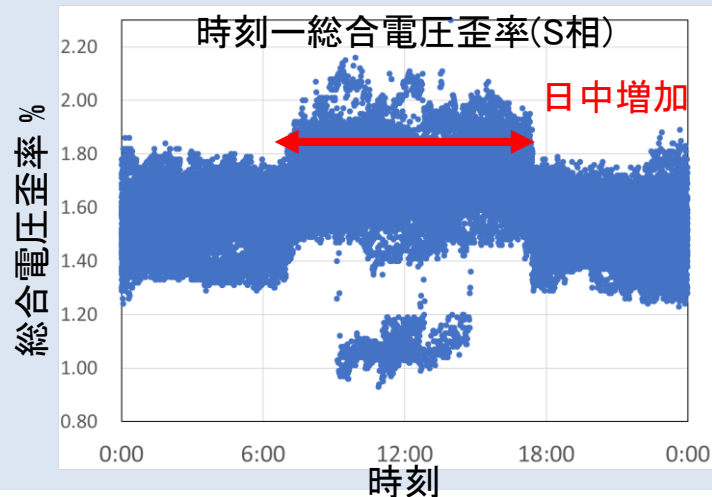
電力品質の良否確認、及び風車及び周辺の工場等が電力品質に与える影響を調査。
風車運転が電力品質に与える影響が小さいことを確認(代表として高調波とフリッカ掲載)

○高調波: 2019年11月27日(水)~12月26日(木)全期間において、「総合電圧歪率 高調波環境目標レベル 3%以下※」を満たすため、電力品質に与える影響は小さい。

※高圧又は特別高圧受電する需要家の高調波抑制対策ガイドラインにおける、特別高圧の高調波環境目標レベル

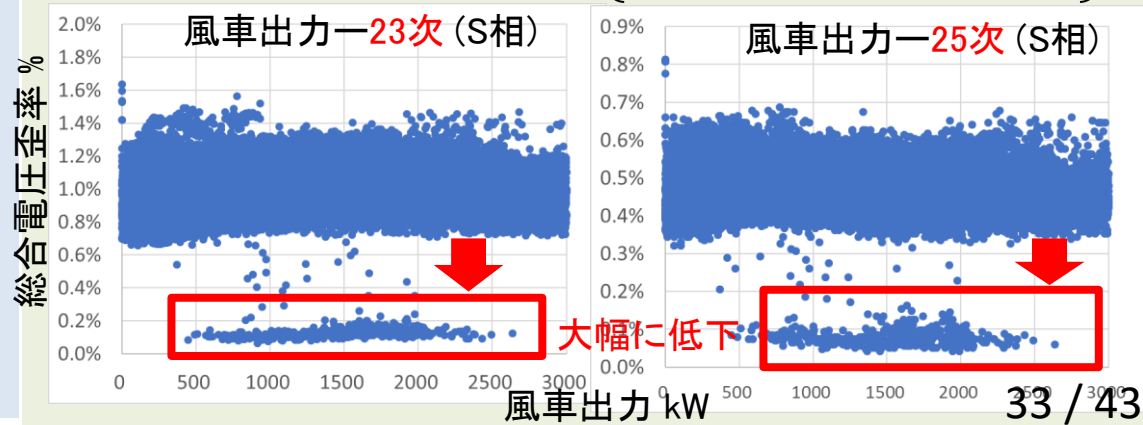


日中の工場操業やビル等の需要及び太陽光発電による高調波増加と推測



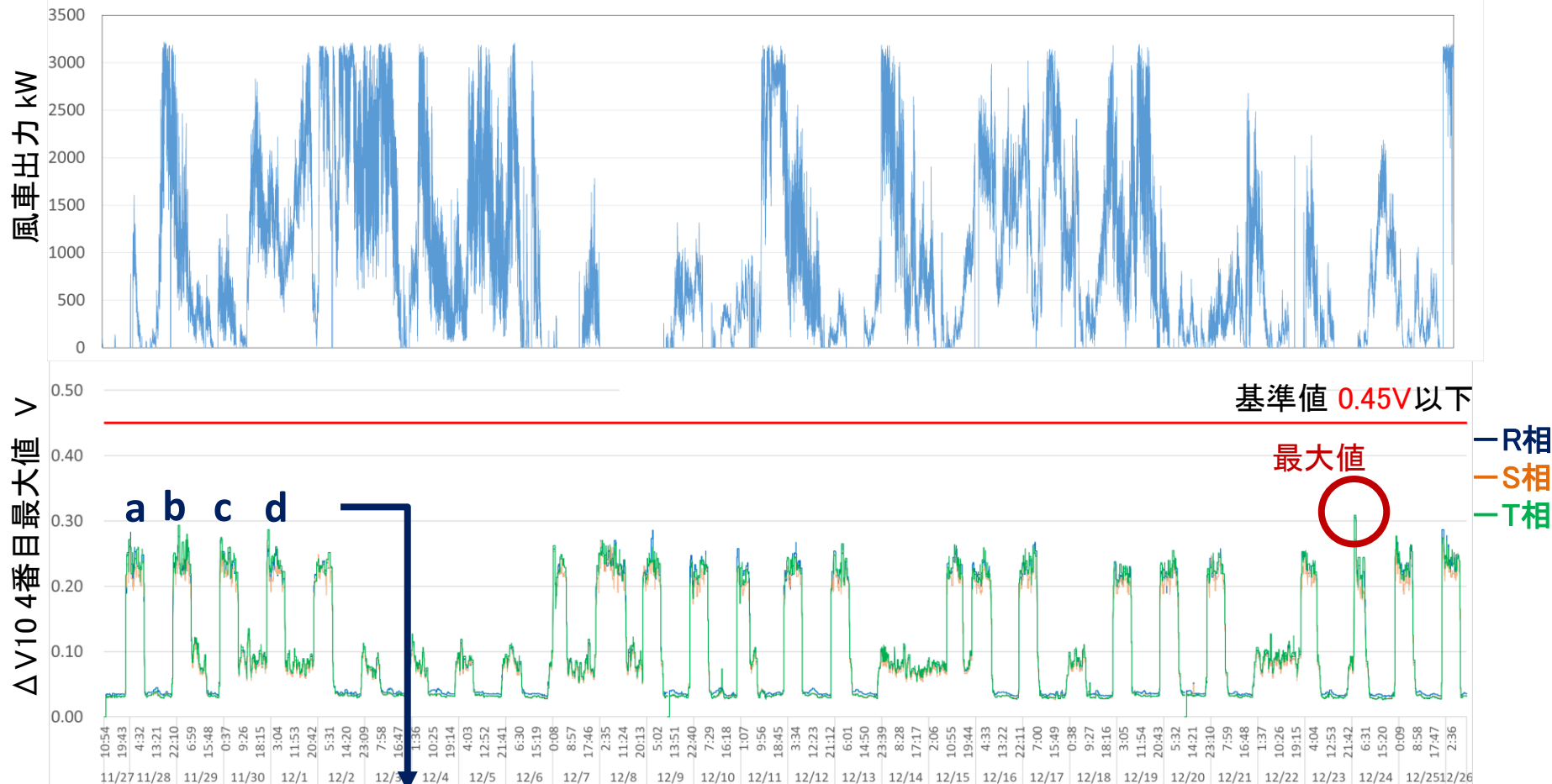
23次と25次の高調波を発生する工場が周辺にあり、右記タイミングで操業停止したと推測

- 11/27(水) 10:54~12:50
- 12/10(火) 9:09~12:39
- 12/19(木) 11:04~14:45
- 12/25(水) 9:15~12:38



6. 電力品質の評価

○フリッカ: 全期間において「 ΔV_{10} 4番目最大値 基準値0.45V以下※」を満たす。 ※系統アクセス基準(九州電力送配電)
このため電力品質に与える影響は小さい ΔV_{10} : 電圧フリッカの尺度



＜フリッカが増加する時間＞

- a 11月27日(水) 22:04～7:21
- b 11月28日(木) 22:04～7:26
- c 11月29日(金) 22:04～7:17
- d 11月30日(土) 22:04～7:13

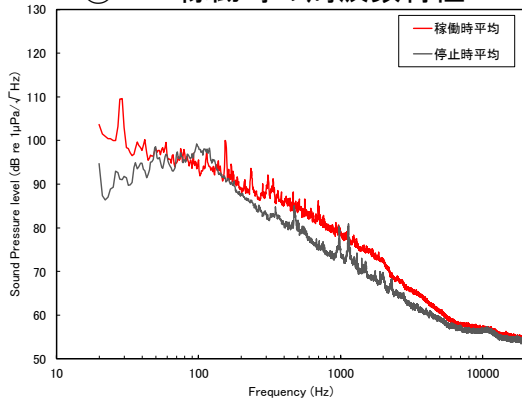
- ・系統連系前後で、フリッカが**夜間に突出**する傾向有
- ・電気炉を保有する製鉄工場等が**夜間電力**を利用して操業している影響(推定)

7. 環境影響評価 -事後調査及び予測・評価結果検証-

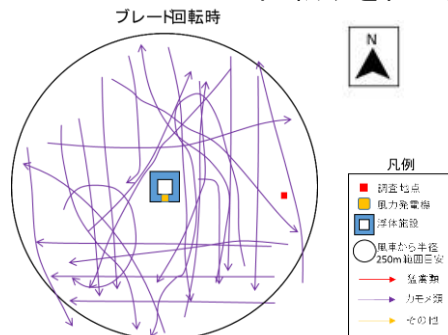
- 着目すべき評価項目(水中音・鳥類・生態系)において、予測の通り顕著な影響は認められなかった
- その他調査項目においても、予測の通り顕著な影響は認められなかった

	①水中音	②鳥類	③生態系
調査	◇稼働時の水中音 方法:風車稼働時、非稼働時の状況を把握	◇目視による調査 方法:船舶からの目視による調査を実施	◇浮体周囲の魚類の蟻集状況 方法:ROVにより浮体周囲の魚類を把握
結果	稼働により、水中音のレベル変化が認められたが、海生生物の聴覚閾値を超える範囲は、風車から30m以内の極僅かな範囲であった。	<ul style="list-style-type: none"> ・移動経路の遮断や生息環境への攪乱は確認されていない ・稼働時は風車を回避、停止時には、ハヤブサ、ミサゴが浮体を休息場として利用。 	浮体施設周囲では魚類の種類数、個体数が設置以降、経年的に増加した。一方、対照区における魚類は確認できなかった。
検証	浮体付近に魚類が生息していることも確認されていることから、魚類への影響は小さいものと推測される。	予測の通り、重要な鳥類への影響は小さい。	予測の通り、生態系への影響は小さい。

①3MW稼働時の周波数特性



②風車周囲における飛翔状況(昼間3日間)
※22~123m: ブレード回転域を含む高度



③ROV撮影されたブリ類の群れ



8. 海域利用者や行政機関との調整、コスト評価等

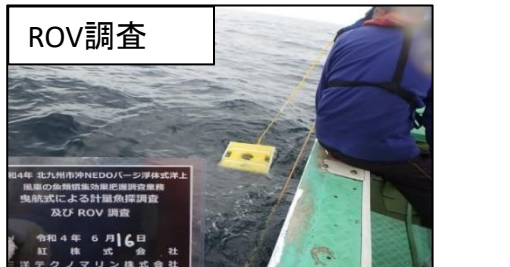
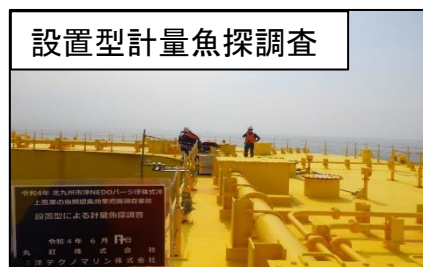
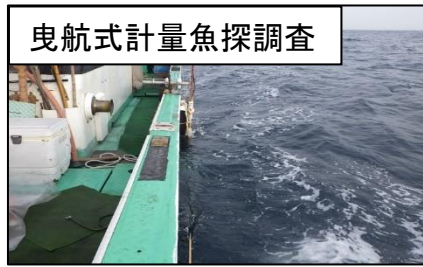
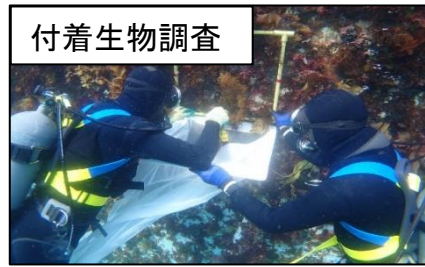
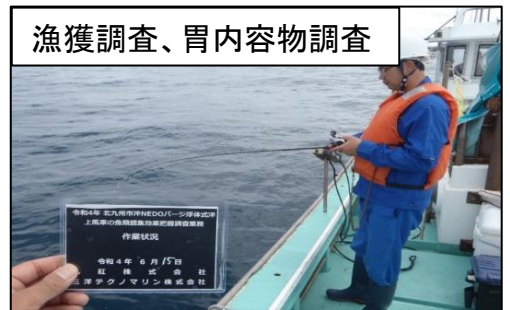
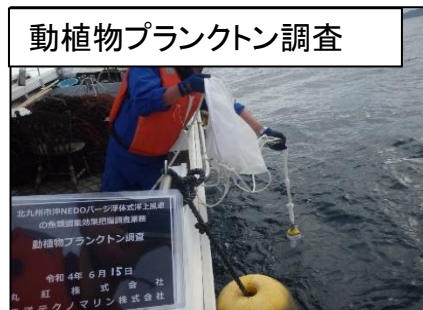
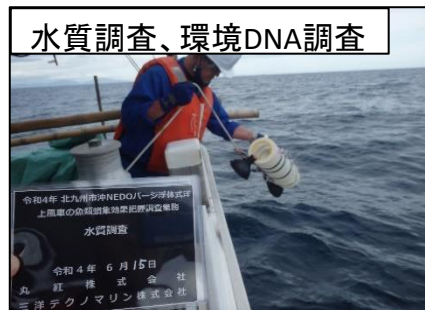
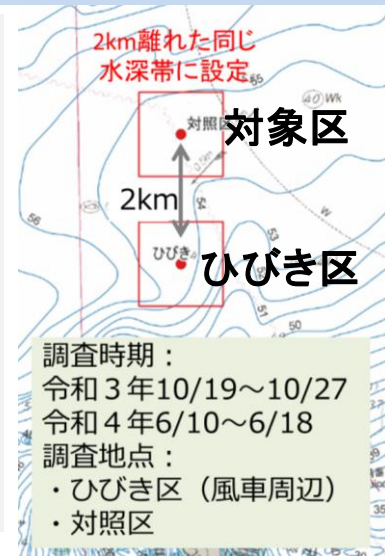
— 魚類蝟集効果把握調査 —

風力発電設備の魚類蝟集効果を示すため、以下の調査を実施した。

- ・水質調査
- ・底質調査
- ・ROV調査
- ・設置型計量魚探調査
- ・曳航式計量魚探調査
- ・環境DNA調査
- ・漁獲調査・胃内容物調査
- ・動植物プランクトン調査
- ・付着生物調査
- ・関係漁業団体ヒアリング

結果として、以下が確認された。

- ・風力発電設備周辺に特異的に魚類が蝟集
- ・風力発電設備周辺に2021年では夜間、2022年では日出・日没頃に魚類が蝟集
- ・対照区に比べ餌料が豊富で、優れた餌料環境



8. 海域利用者や行政機関との調整、コスト評価等

－魚類蝟集効果把握調査－

(まとめ・考察)

- A) 風車周辺には岩礁性を好む種が多く生息しており、計量魚探調査の結果、対照区と比べて多くの魚類の蝟集が確認された。回遊魚のみではなく、底生性の魚が実証機周辺を好んで利用している可能性がある。
- B) 風車周辺で採取された個体の胃内容物を見ると、実証機上の付着生物と似た種類を示していることから、風車周辺は優れた餌料環境である可能性が示唆された。
- C) 風車を中心として南、南西方向の天然礁まで生息範囲が伸びている可能性があり、ウインドファーム化した場合の魚類の回廊(コリドー)形成の可能性が示唆された。
- D) 洋上風力と漁業の共生の在り方について、関係漁業団体ヒアリング内容も加味した今後の課題や期待についての更なる検証が求められる。

8. 海域利用者や行政機関との調整、コスト評価等

ーコスト評価ー

- 浮体式洋上風力のコストについて、本実証事業の実績値を整理するとともに、大型WF化（15MW×40基＝600MW）を想定した場合のコスト低減の可能性を検討した。

CAPEX	本実証事業のCAPEX (万円/kW)	大型WFを想定したCAPEX (万円/kW)	低減根拠
風車	42.8	14.0	BVGA報告書より14万円/kWまで低減可能と仮定。
浮体建造	63.3	19.4	15MW風車を想定した浮体の製作・組立手法の検討より。
係留索※1	22.8	12.4	15MW風車を想定した浮体の製作・組立手法の検討より。
電気関連	46.9	13.8	複数の送電電圧帯シナリオにおけるコスト比較検討より。最も安価であった220kV送電(洋上変電所有り)を採用。
施工 (電気関連以外)	60.3	8.0	15MW風車を想定した浮体の製作・組立手法の検討より。
その他	0.2	0.2	本実証事業と同様。
合計	236.2	67.8	

※1 本実証事業で検討した繊維ロープは、NK認証の取得可否等の観点から実現性の担保が困難であるため、今回はコスト低減策として考慮していない。

OPEX	本実証事業のOPEX※2 (万円/kW/年)	大型WFを想定したOPEX (万円/kW/年)	低減根拠
点検費・人件費	5.23	0.98	欧州におけるOPEX低減の見通しに、OPEXに占める点検費・人件費を乗じたもの。※3
備船費	4.97	0.04	BVGA報告書のCTV備船費1.3億円/年までのコスト低減を考慮した上で、風車40基を2隻のCTVで管理すると仮定。
保険費	1.71	0.2	IEA報告書より0.2万円/kW/年まで低減可能と仮定。
その他	0.5	0.5	令和元年度～令和3年度までの実績値。
合計	12.41	1.72	

※2 令和2年度～令和3年度予算額の平均値

※3 欧州におけるOPEX低減見通しの1万円について、「洋上風力に係る官民連携の在り方の検討(サプライチェーン形成に向けた仕組みの検討等)のための調査」報告書よりOPEXに占める点検費・人件費のコスト割合を乗じたもの。ただし、当該報告書の数値より保険費や本事業のその他費用に相当するコストを切り出すことは困難であったため、OPEXに占める保険やその他費用の占める割合は大きくないこと、保守的に分析する観点より、洋上ロジスティクスのコストのみを除外

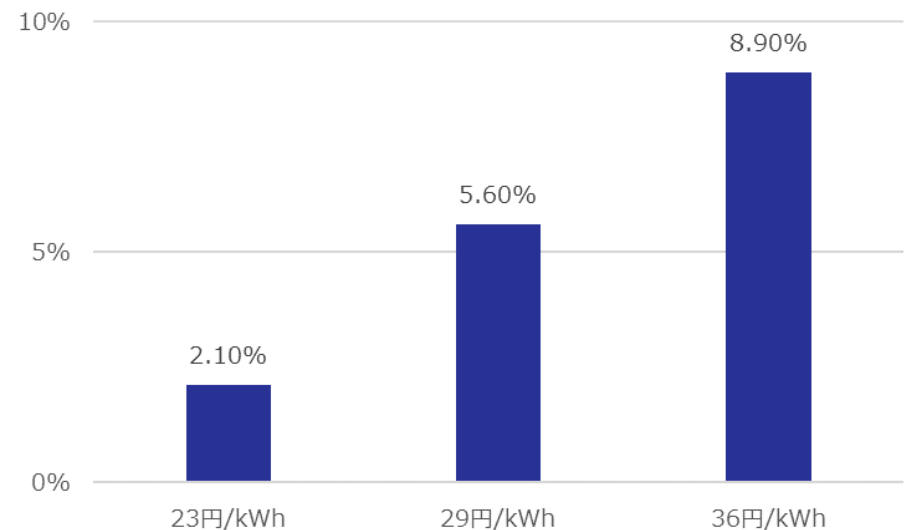
8. 海域利用者や行政機関との調整、コスト評価等

ーコスト評価ー

- 本実証事業の実績・検討を踏まえた前提条件を設定の上、事業性評価を実施した結果、大型WF化（15MW×40基＝600MW）を想定した場合で、売電価格 23円/kWhのケースでプロジェクトIRRが2.1%、五島市沖（一般海域）入札価格である36円/kWhの場合では、8.9%となった。

	23円/kWh	29円/kWh	36円/kWh
設備利用率 33.0%	2.1%	5.6%	8.9%

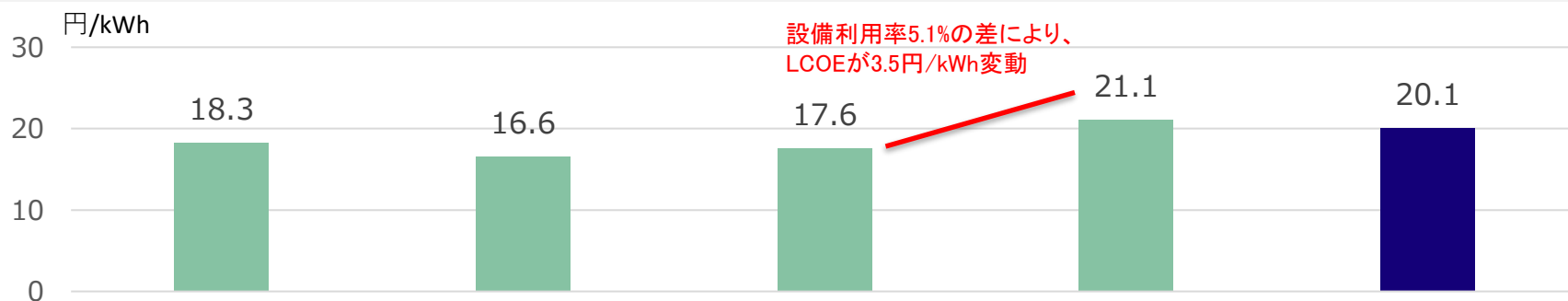
CAPEX	67.8万円/kW
OPEX	1.72万円/kW/年
設備利用率	33.0%
建設期間	3年間
事業実施期間	20年間
WF容量	600MW (15MW × 40基)



8. 海域利用者や行政機関との調整、コスト評価等

ーコスト評価ー

- 本実証事業の大型WFケースと、NRELの実施する米国での浮体式洋上風力の事業性分析の結果を比較した。前提条件やCAPEXの内訳の違いを考慮し、段階的（ケース1~4）にNEDO大型WFケースと前提条件を揃え、事業性の異なる要因を整理した。（IRRは考慮していない。）
- NEDO大型WFケースとの差としては、**設備利用率が5%以上異なることが最も大きな要因であり、3.5円/kWh程度の影響がある。**



	NREL ケース1	NREL ケース2	NREL ケース3	NREL ケース4	NEDO 大型WFケース
	ファイナンスに関する諸元をNEDO大型WFケースと統一	ケース1に加え、本実証モデルで含まれていないコンティンジェンシー等のCAPEXを除外	ケース2に加え、事業期間を20年に短縮	ケース3に加え、設備利用率を本実証と同水準	—
CAPEX (万円/kW)	80.9	<u>69.3</u>	69.3	69.3	67.7
OPEX (万円/kW/年)	1.70				1.72
事業期間(年)	25	25	<u>20</u>	20	20
設備利用率	38.1%	38.1%	38.1%	<u>33.0%</u>	33.0%

9. 国民との対話

【実証事業を通じた成果】

- 北九州市エコタウンセンター一次世代エネルギーパークでの常設展示を行い、風力発電事業を身近でわかりやすく体験できると見学者から好評を得た。
- 北九州市西日本総合展示場で開催された「エコテクノ」に2017～2022(2020中止)まで出展し、2017～2019まで地元の学生を対象に出前講義を実施し、本実証研究の成果と洋上発電事業の意義を周知することができた。さらに多くの来場者から熱心な質問を受け、活発な意見交換を行うことができた。
- 気象・海象観測データ、風車画像のリアルタイム配信ページを構築し、実証研究ホームページによる情報発信を行い、本実証事業に対する地元および一般社会の国全体の理解を向上することができた。

9. 国民との対話 —地元への情報発信と対話—

- ・北九州市エコタウンセンター次世代エネルギーパークでの常設展示継続
 常設展示は、風力発電事業を身近でわかりやすく体験できる、と見学者から好評を得た。
- ・北九州市西日本総合展示場で開催された「エコテクノ2017～2022(2020は中止)」出展
 - NEDO次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究(バージ型)「ひびき」として出展を行った。
 - 風車模型、実物大チェーン模型、ケーブル模型を展示し、モニターでは浮体説明動画を上映した。
 - 風力発電に関心のある地元企業および地元住民との意見交換を行った。
 - 多くの来場者から熱心な質問を受け、本実証事業について活発な意見交換を行うことができた。



北九州市エコタウンセンター
次世代エネルギーパーク展示



エコテクノ2022展示
総来場者数 13,749人

9. 国民との対話 一般社会を対象とした情報発信と対話一

・実証研究ホームページによる情報発信

- 気象・海象観測データ、風車画像のリアルタイム配信ページを構築し、情報発信を行った。
- 研究の成果と洋上発電事業の意義を一般社会に広く発信し、本実証事業に対する地元および一般社会の国全体の理解を向上することができた。
- 地元住民や漁業関係者にリアルタイム配信データを広く周知した。



実証研究
ホームページ