

浮体式洋上風力発電設備のダイナミックケーブルに対する付着生物の調査結果と維持管理の取組



大窪 慈生 ①
三谷 俊輔 ②
東谷 修 ③
新里 英幸 ④

出典：NEDO

要旨

日立造船は、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「次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（バージ型）」として、北九州沖に3 MWバージ型浮体式洋上風力発電設備を設置し、2019年より実証運転を行っている。本実証運転中にダイナミックケーブルに生物が付着し、その影響でダイナミックケーブルが沈下する事象が発生した。

本報では、ブイの追加によるダイナミックケーブルの復旧工事、付着生物量の調査結果および維持管理への取組について報告する。付着生物量の調査で、付着の厚さと水深、重量と水深に関する経年変化のデータを整理した結果、水深と付着生物量との関係が顕著であった。また、維持管理のためダイナミックケーブルの深度のモニタリングに取組み、比較的安価な装置で遠隔モニタリングが可能であることを実証できた。さらに、ROV（Remotely Operated Vehicle）を用いた付着生物除去にも取組み、将来の実用性について検証を行った。

キーワード

浮体式洋上風力発電設備、ダイナミックケーブル、付着生物、遠隔モニタリング

1. 緒言

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）の委託業務として、次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（バージ型）に取り組んでいる（図1）。実証機を北九州市沖約15 kmの海域に設置し、2019年5月から実証運転している。浮体には電力ケーブルが接続されており、浮体から約250 m区間は浮体の波浪等による運動に追従できるよう、浮かせた状態になっている。この浮遊区間の電力ケーブルをダイナミックケーブルと呼んでいる。ダイナミックケーブルは重量と浮力のバランスで深さ方向の形状が維持されており、付着生物による重量変化の影響を受けやすいため、設計段階での付着生物量の想定や維持管理での形状の確認が重要となる¹⁾。

本実証運転中にダイナミックケーブルが沈下する事象が生じたため、ブイを追加してダイナミックケーブルを浮上させる復旧工事を行い、付着生物量を調査して、ダイナミックケーブル沈下の要因が付着生物の影響であるこ



図1 バージ型浮体式洋上風力発電設備
(出典：NEDO)

とを特定した²⁾。復旧後は付着生物量の調査だけでなく、ダイナミックケーブルの維持管理のため、深度のモニタリングおよび付着生物除去手法の開発に取組んできた。本稿では、実証機のダイナミックケーブルへの付着生物の調査結果および維持管理への取組について述べる。

2. ダイナミックケーブルの沈下と復旧

2.1 ダイナミックケーブルの形状 本実証機は水深54 mと浮体式洋上風力発電設備としては比較的浅

① 脱炭素化事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部 博士(工学)
② 脱炭素化事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部
③ 脱炭素化事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部 技術士(建設部門)
④ 機械・インフラ事業本部 開発センター 技術士(船舶・海洋部門) 博士(工学)

い海域に設置されている。浮体の水平変位に対応できるようにダイナミックケーブルに凹凸部を2連設けており、凸部にブイを取り付けて浮力を持たせている(図2)。この際、船舶航行を考慮して凸部頂点の深度を20 mとした。また、浮体から2つ目の凸部(図2のTop②)にはY字形のテザーをシンカーに接続しており、ブイによる浮力とテザーの張力により、ダイナミックケーブルの浮上の防止、形状保持、付着生物による沈下対策を行っている。設計段階では、マリノフォーラム(MF) 21浮魚礁設計・施工技術基準³⁾の係留索に適用される付着生物水中重量4 kgf/m²をダイナミックケーブル全線に対して考慮し、沈下により凹部が着底しないことを確認していた。

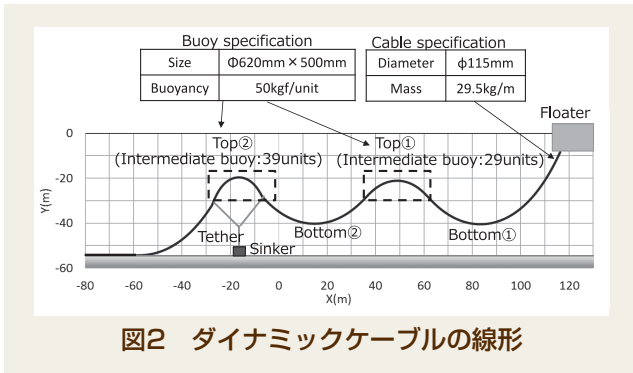


図2 ダイナミックケーブルの線形

2.2 沈下と復旧の時系列 ダイナミックケーブルの沈下と復旧に関する経過を以下に、設計、施工後、沈下後のダイナミックケーブルの形状を図3に示す。

- ▶ 2018年9月：ダイナミックケーブルを施工
- ▶ 2020年8月：ROV調査でダイナミックケーブルの沈下とBottom②の着底を確認、ROVで付着生物を一部除去
- ▶ 2020年10月：Top①と②へのブイ追加によりダイナミックケーブルを復旧、付着生物量を調査

2.3 ダイナミックケーブルの施工 2018年9月にダイナミックケーブルを施工し、浮体に接続した。施工後にROVでダイナミックケーブルの形状を確認し、概ね設計どおりの形状となっていることを確認した。

2.4 ROV調査による沈下・着底の確認 2020年8月にROVでダイナミックケーブルの形状を確認したところ、多くの生物の付着が見られ、全体的に15 m程沈下しており、浮体から二つ目の凹部(Bottom②)は海底に着底していることを確認した。

ダイナミックケーブルへの生物の付着状況を図4～10に示す。浮体付近の水深が浅い区間には多くの生物が付着している。水深が50 m以深まで沈下したBottom①②について、浅水区間に比べると量は少ないものの付着があることが確認された。ブイが取り付けられているTop①②は、沈下時は水深30～40 mに位置していた。Top②のブイには多くの生物が付着しているが、Top①の一部のブイには2018年9月の施工前に生物の付着を防止する防汚塗料を塗布しており、実証機設置から約2年が経過した今回の調査時点での付着生物の量は僅かであった。Top②の方がTop①と比べて生物付着量が多かったにも関わ

らず、Top②の沈み込み量が少なかったのは、Top②の方が多くのブイが取り付けられており、Y字のテザーとシンカーで浮上を防止する構造としていたためである。

同月下旬にダイナミックケーブルを浮上させるため、ROVで付着生物の除去作業を実施したが、一部を除去したのみで、ダイナミックケーブルの浮上量は2 m程度であった。

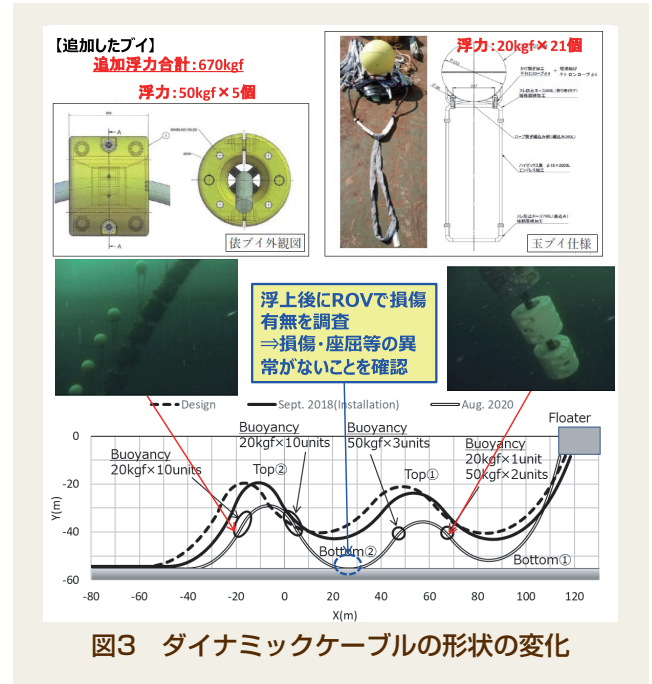


図3 ダイナミックケーブルの形状の変化



図4 ダイナミックケーブルの浮体への引上げ部

2.5 ブイ追加による復旧 2020年10月にブイの追加、ダイナミックケーブルへの付着生物量の調査、着底部のダイナミックケーブル損傷有無の調査を行った。ブイ追加工事では、図3に示すとおり浮力20 kgfのブイを21個、浮力50 kgfのブイを5個、合計670 kgfのブイを取り付けた。ブイ取付後は設計並びに当初施工時と同等の位置・形状までダイナミックケーブルが浮上した。次章に付着生物の調査結果を示すが、調査結果からダイナミックケーブル全体への付着生物重量を推定した値と今回追加したブイの浮力合計が概ね一致する結果となった。

また、着底箇所のダイナミックケーブルは、潮流等による海底との擦れによる損傷の恐れがあったが、ダイナミックケーブル浮上後にROVによる調査で損傷等の異常がないことを確認した。

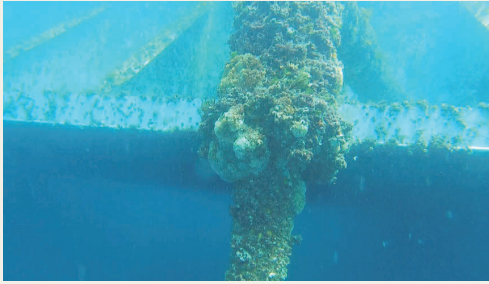


図5 放出点 (水深8.3 m)

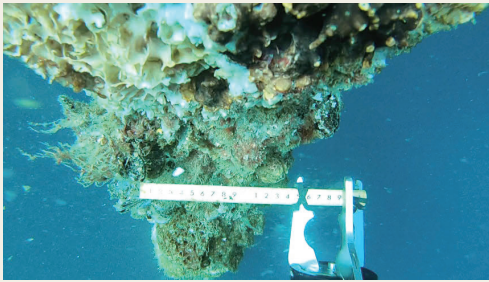


図6 放出点下部 (水深20 m)



図7 Bottom① (水深52 m)



図8 Top① (水深38 m)

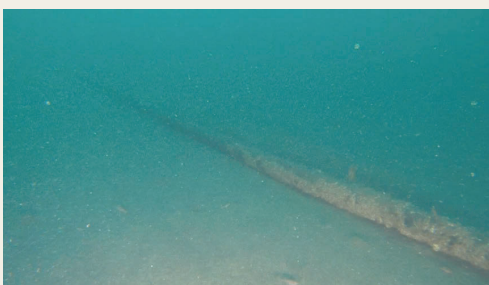


図9 Bottom② (水深54 m)



図10 Top② (水深32 m)

3. 付着生物量の調査

3.1 調査内容および調査方法 2020年10月のブイ追加工事の際と、2022年11月に付着生物量の調査を実施した。調査方法および調査内容を表1に、調査箇所を図11に示す。

重量はダイバーにより試料を採取し、バネばかりで直接水中重量を計測する方法(表1のa))と、ROVによる画像計測で得られた厚さと付近のダイバー採取地点での等価密度から算出する方法(表1のb))で調査した。

表1 付着生物調査の内容および方法

時期	内容	方法	調査位置(図11)
2020年10月	重量	a) ダイバーによる採取	No. 2, 6, 7, 9, 10
		b) ROV画像で得られた厚さと等価密度から算出	No. 1, 3, 4, 5, 8
	厚さ	c) ダイバーによる直接計測	No. 2, 6, 7, 9, 10
		d) ROVによる画像計測	No. 1, 3, 4, 5, 8
2022年11月	厚さ	d) ROVによる画像計測	No. 11, 12, 13, 14, 15, 16

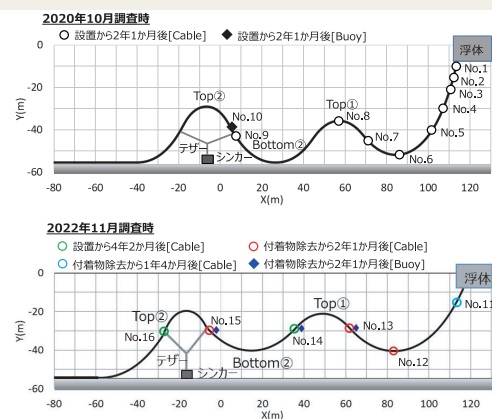
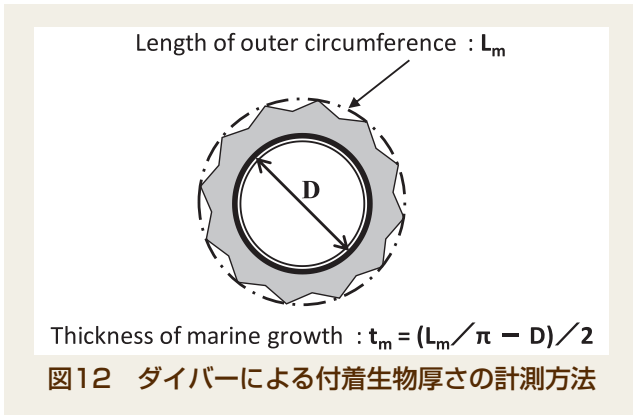


図11 付着生物調査位置

厚さは、ダイバーによる直接計測する方法(表1のc))と、ROVにより撮影した画像データから計測する方法(表1のd))で調査した。ダイバーによる直接計測では、ダイナミックケーブルおよびブイの外周長(L_m)を計測することで厚さ(t_m)を求めた(図12)。ROVによる画像計測例を図13に示す。



3.2 付着生物重量の調査結果 単位表面積当りの付着生物重量と水深の関係を図14に示す。図14の重量は全て設置から2年1か月が経過した2020年10月のデータである。

重量と水深に強い相関が確認でき、水深が増加するにつれて重量は直線的に減少していることがわかる。水深40 m以深でも2 kgf/m²程度の付着が見られる。

設計で考慮した4 kgf/m²は水深約37 mでの重量に該当する。これを全線に対して適用し、付着生物重量を過小評価したことが、ダイナミックケーブル沈下の原因であったといえる。本調査結果より、2020年10月時点でダイナミックケーブルに付着していた生物の推定総重量は664 kgf²⁾であり、追加したブイの浮力合計(670 kgf)と同等である。ダイナミックケーブル沈下原因の詳細や数値解析によるダイナミックケーブル沈下状態のトレース等の詳細分析は参考文献²⁾を参照されたい。

3.3 付着生物厚さの調査結果 付着生物厚さと水深の関係を図15に示す。図15の厚さは2020年10月のデータに加えて、2022年11月の調査時のデータも含まれている。2022年11月は下記箇所について調査を行った。

- 設置から一度も付着生物を除去していない箇所(設置から4年2か月が経過)
- 2020年10月に付着生物を除去した箇所(除去から2年1か月が経過)
- 2021年7月に付着生物を除去した箇所(除去から1年4か月が経過)

重量と同様に、厚さも水深との相関が確認できる。水深40 m以深でも厚さは零にはならず10 mm程度の付着が見られる。付着生物を除去した箇所でも、除去作業か

ら1~2年経過後に付着生物が見られ、最大で除去前と同等の厚さの生物が付着していることが確認された。一方、設置から4年間一度も除去していない箇所については、設置から2年1か月経過後の厚さと同等で、2年経過後からの明らかな付着生物量の増加は確認されなかった。設計で適切に付着生物量を設定するためには、付着生物量の限界点を把握する必要がある、今後もROVによる調査を実施して、実証運転終了まで付着生物量に関するデータを蓄積していきたい。

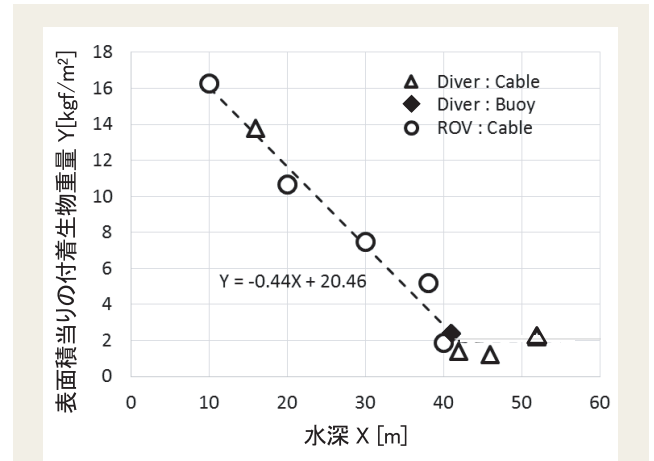


図14 水深と表面積当りの付着生物重量の関係

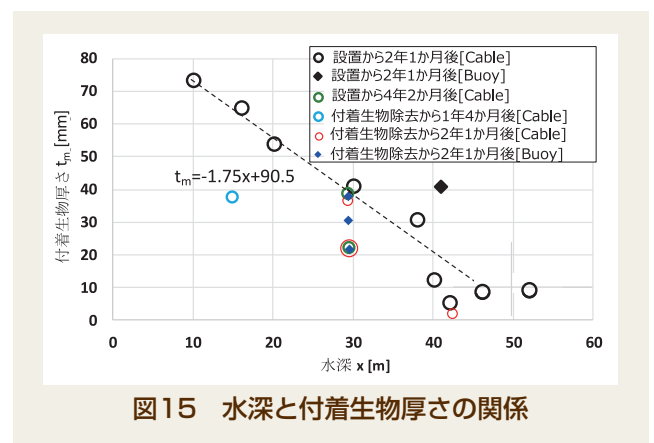


図15 水深と付着生物厚さの関係

4. ダイナミックケーブル線形のモニタリング

設計での適切な付着生物量の設定に加え、設置後はダイナミックケーブル深度のモニタリングが重要である。2020年10月のブイ追加による復旧工事以降、以下の方法によりモニタリングを行ってきた。

- ROVによる深度計測
- 水位計による深度計測

ROVによる深度計測は2021年7月、2022年7月と11月に実施した。計測結果を図16に示す。いずれの調査時においても、2つのTop、Bottomの深度を計測することでダイナミックケーブル全体の線形を把握した。加えて、ROVの画像によりダイナミックケーブルへの生物の付着状況や損傷等の問題が生じていないことも確認した。

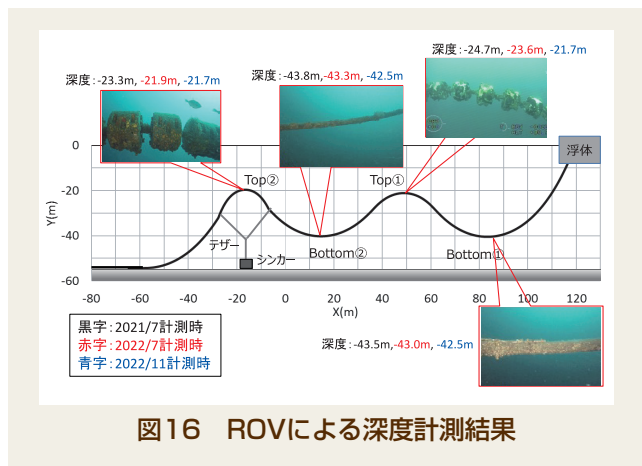


図16 ROVによる深度計測結果

ダイナミックケーブルの深度を遠隔でモニタリングする方法として、試験的に水位計をダイナミックケーブルのBottom①にダイバー作業により取付け、深度を1時間刻みで計測した(図17)。計測したデータは有線で浮体内PCまで引込み、陸上で遠隔から確認できるようにした。2021年8月28日～2021年12月9日、2022年7月13日～2022年9月1日の計測結果を図18に示す。

モニタリングの結果、ダイナミックケーブルは水深42 mを平均にして、±2 mの範囲で推移しており、大きな沈下と着底がないことを確認した。また、ROVによる深度計測結果と概ね一致していることから、本手法により妥当な計測結果が得られていると考えられる。

ROVによる深度計測はダイナミックケーブル全体の形状、深度のほか、損傷有無等の状態も併せて確認することができるが、海象条件等により作業が制限されること、調査位置までの移動や作業に多くの時間と費用を要する等の課題がある。今回試行した水位計による深度計測は比較的安価で簡易な装置により遠隔で深度のモニタリングが可能であり、ダイナミックケーブルの維持管理を行う上で有効な手法であることが確認できた。一方で、今回は後付けで水位計を取付けたため、取付け部の構造が脆弱で波浪により水位計のケーブルが破損し、データの取得は数か月程度と限られた期間のみとなった。今後の浮体式洋上風力発電設備では、遠隔監視ができて設備を実証機設置前に取り付けておくことが望ましい。

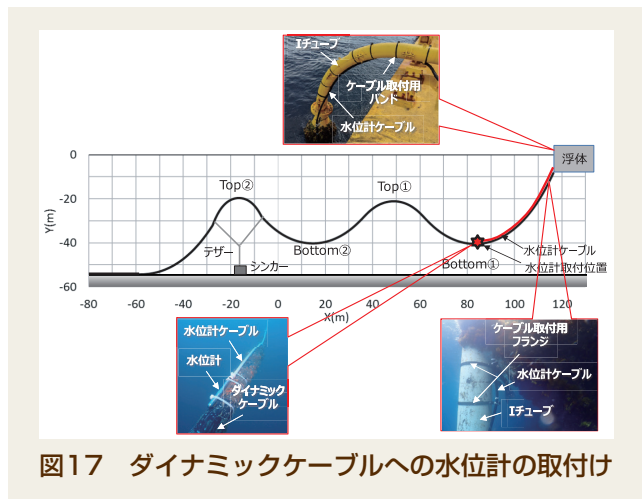


図17 ダイナミックケーブルへの水位計の取付け

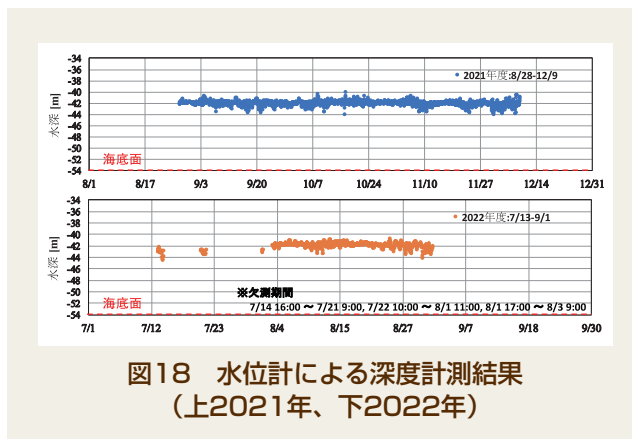


図18 水位計による深度計測結果 (上2021年、下2022年)

5. 付着生物除去の取組

付着生物量は設置海域の環境等に依存する。設計で設定した以上に生物が付着した場合に備えて、本実証研究では、ROVを用いた付着生物の除去を検討してきた。

除去作業は、ROVに専用の治具を装着し、治具を介して発射するキャビテーションジェットにより行った。除去に用いたROVと除去作業の様子を図19および図20に示す。

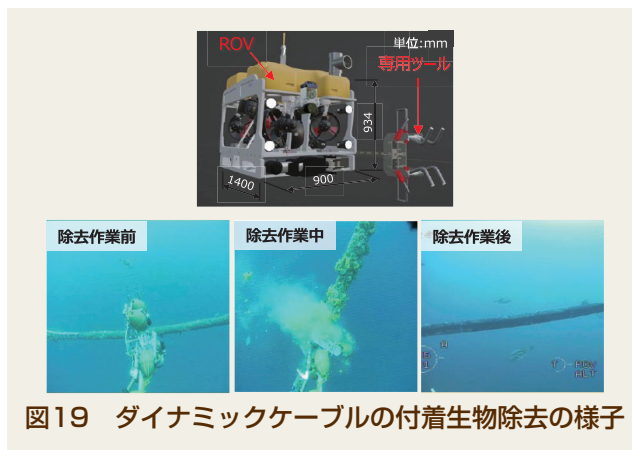


図19 ダイナミックケーブルの付着生物除去の様子

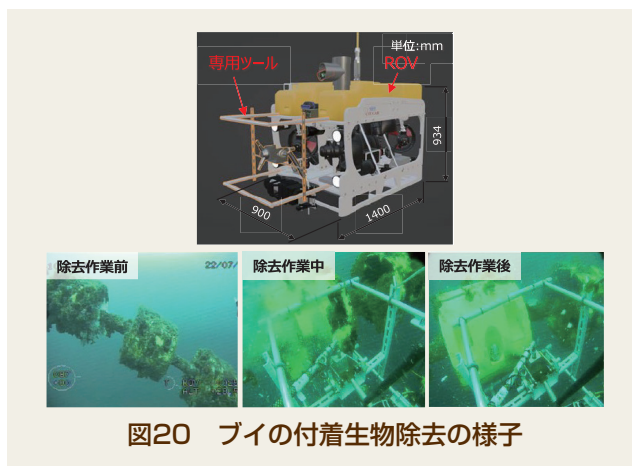


図20 ブイの付着生物除去の様子

付着生物除去作業は2021年7月と2022年7月に実施した。除去に要した時間を表2に示す。図19、図20は2022年7月の除去作業の様子であるが、専用ツールの改良とROVオペレータの習熟度向上により、除去作業に要する時間を前年より大幅に短縮することができた。除去前後

でダイナミックケーブルの深度を計測しており、付着生物の除去効果によりダイナミックケーブル全体が約1 m浮上したことを確認した。

表2 ROVによる付着生物除去に要した時間

	ダイナミックケーブル	ブイ
2021年7月	5.2分/m	18.5分/個
2022年7月	1.8分/m	3.0分/個

6. 結 言

設置から約2年が経過した浮体式洋上風力発電設備実証機でダイナミックケーブルが沈下し、一部が海底に着底する事態が発生した。ブイの追加により元どおりの位置に復旧させ、あわせて付着生物量の調査と評価を実施した。その結果、厚さ、重量とも水深の影響が顕著であること、ケーブル沈下の原因としては、設計時に考慮した付着重量が過少評価であることがわかった。

実証運転期間中に付着生物量の追加調査を実施するとともに、ダイナミックケーブル形状の変化に関するモニタリングや除去作業についても取り組んできた。付着生物を除去した箇所も、1~2年経過後には生物の付着が見られ、最大で除去前と同等の厚さの生物が付着していることが確認された。一方、設置から2年経過以降は付着生物量の顕著な増加は確認されなかった。付着生物量の限界点を把握することは設計指針を整備する上で重要であるため、実証運転終了まで付着生物量に関するデータを蓄積していきたい。

ダイナミックケーブルのモニタリングでは、ROVによる深度計測の他、深度の遠隔モニタリングに取り組んだ。水位計による深度計測は比較的安価で簡易な装置による遠隔モニタリングが可能で、ダイナミックケーブルの維持

管理を行う上で有効な手法であることが確認できた。

付着生物除去についても、実証機設置当初からROVによる試験を実施しており、専用ツールの改良、ROVオペレータの習熟度向上により、除去に要する時間を短縮できた。

本実証研究の経験から、付着生物対策として、設計で適切に生物付着量を設定しておくこと、設置後は定期的にダイナミックケーブルの深度を監視することが重要といえる。また、有事の際に備えて付着生物の除去等、維持管理の方法を確立していくことが期待される。本実証研究での取り組みが今後の浮体式洋上風力発電設備の設計指針の整備促進の参考になれば幸いである。

謝 辞

本実証研究はNEDOの委託業務として実施されたものである。関係者の皆様方に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 福島洋上風力コンソーシアム：平成30年度福島沖での浮体式洋上風力発電システムの実証研究事業報告書 概要版, 2019.
- 2) 大窪慈生, 三谷俊輔, 東谷修ほか：浮体式洋上風力発電設備のダイナミックケーブルへの付着生物調査, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2021, 11.
- 3) 社団法人マリノフォーラム21：浮魚礁設計・施工技術基準, 1992.

文責者

日立造船株式会社 脱炭素化事業本部
風力発電事業統括部 技術・開発部 構造グループ
大窪慈生
E-mail : ohkubo_s@hitachizosen.co.jp

Investigation Results of Marine Growth on Dynamic Cable of Floating Offshore Wind Turbine and Demonstration of Maintenance Methods

Abstract

As part of a demonstration project commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Hitachi Zosen installed a 3 MW barge-type floating offshore wind turbine (FOWT) in Kitakyushu and has been carrying out a demonstration operation since 2019. During this demonstration operation, the dynamic cable subsided and landed on the seabed due to marine growth.

This paper describes the restoration work of the dynamic cable by adding buoys, the investigation results of the marine growth on the dynamic cable, and the demonstration of our maintenance technologies. In our investigation into the amount of marine growth, we organized the data on the transitions in thickness of marine growth and water depth, and in weight and water depth, and found a remarkable relationship between the amount of marine growth and water depth. We also worked to monitor the depth of the dynamic cable for maintenance purposes and demonstrated that remote monitoring is possible with relatively inexpensive equipment. Furthermore, we worked on the removal of the marine growth using a remotely operated vehicle (ROV) and verified its practicality in the future.

Authors

Shigeki Okubo (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : ohkubo_s@hitachizosen.co.jp)
Shunsuke Mitani Osamu Azumaya Hideyuki Niizato