



Title	洋上風力向けダイナミックケーブル
Author(s)	鈴木, 孝幸; 阿部, 和俊; 助川, 琢也 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2020, 29, p. 31-38
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/77722
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

洋上風力向けダイナミックケーブル

鈴木 孝幸、阿部 和俊、助川 琢也

東 大介、西川 正利、谷之木 良太

住友電気工業株式会社 〒541-0041 大阪府中央区北浜 4-5-33

Dynamic Cable for Floating Offshore Wind Turbine

Takayuki Suzuki, Kazutoshi Abe, Takuya Sukegawa
Daisuke Azuma, Masatoshi Nishikawa, Ryota Taninoki

SUMITOMO Electric Industries, Ltd 4-5-33, Kitahama, Chuo-ku, Osaka 541-0041, Japan

The floating offshore wind turbine has a potential possibility to be adopted in the deep sea all around Japan. The development of the dynamic cable which required for power transmission has successfully been completed. This paper describes the challenging development of the dynamic cable and established in-house analysis method for further technological development.

キーワード：洋上風力発電、浮体式、海底ケーブル、ダイナミックケーブル

1. はじめに

近年、地球温暖化対策として風力発電などの再生可能エネルギーの導入への関心が高まっており、特に洋上風力発電は高効率な発電が望めることなどから注目されている。

洋上風力発電については海外での開発が先行しているが、日本においても実証機を含め合計 65MW が運転しており、将来の建設が検討されている事業計画を合わせると 5GW 規模となる⁽¹⁾。最近の動向では、2021 年度から日本初の大型発電所(ウインドファーム)が秋田県沖で着工されることが報告されている⁽²⁾。

この洋上風力の中で、海面に風車を浮かべる浮体式洋上風力発電については、風車位置が運転中に絶えず変化することから、従来のケーブルでの主な使用環境とは異なる、常時の挙動に耐えうるケーブルシステムが必要となる。

本稿では、この環境に適用可能なダイナミックケーブルシステムの開発に関して報告する。

2. 浮体式洋上風力発電について

洋上風力発電には図 1 に示すように、二種類の設置形態が存在する。日本では沿岸海域の水深が深く、海底に風車を固定する着床式洋上風力の設置場所が限られるため、海面に風車を浮かべる浮体式洋上風力が注目されている。

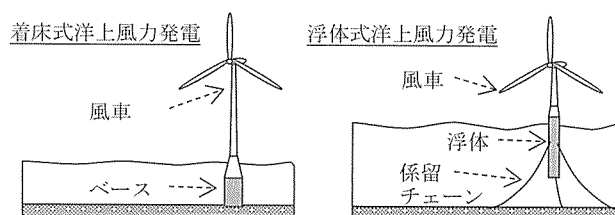


図 1 洋上風力発電の概要

Fig.1 Profile for two types of offshore wind turbine

日本では環境省により、長崎県五島列島沖を実証海域とした、国内初となる浮体式洋上風力発電の実証事業が 2010 年度より開始され、100kW 小規模試験機及び、2MW 実証機による実証が行われた。実施海域を図 2 に示す。

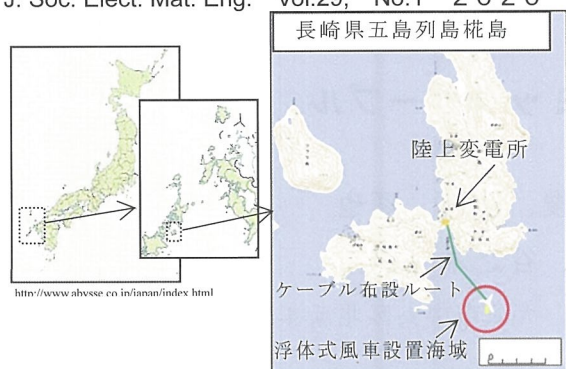


図2 環境省実証事業実施海域

Fig.2 Location of field test

3. ダイナミックケーブルシステムの開発

3. 1 ダイナミックケーブルとは

従来の海底ケーブルは、海底に設置、又は、固定された状態で使用される。一方、浮体式洋上風力発電施設に適用するケーブルは、浮体の挙動に追随するために、図3に示すような海中浮遊部を設けたレイアウトで布設される。ケーブルには潮流や浮体挙動に伴う曲げ、捻れなどの連続した力が働くため、ケーブルの各部位の機械的損傷が懸念される⁽³⁾。

洋上の風車から陸地へ安定した送電を実現するためには、ダイナミックケーブルと呼ばれる機械的強度に優れた電力ケーブルが必要となる。

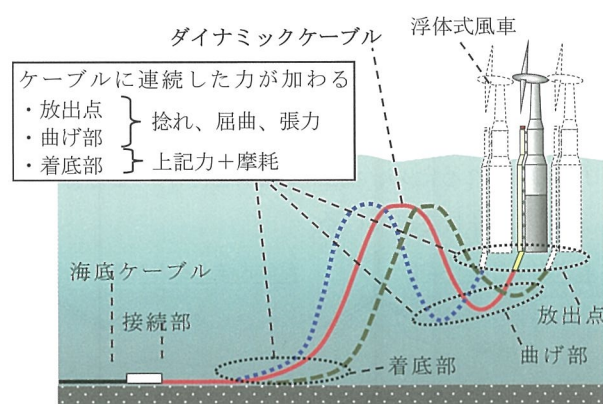


図3 浮体式風車へのケーブル接続例

Fig.3 Example for dynamic cable system

3. 2 ダイナミックケーブルの基本設計

(1) ダイナミックケーブルの構造

電力ケーブルの仕様は、発電機容量、並びに、連携する陸上部の系統電圧を考慮し決定されるが、将来のウィンドファームにおいて主流になると考えら

れる 66kV 級 3 心 CV ケーブルを想定した設計を採用した。

導体、絶縁体などは従来の海底ケーブルと同様の設計とし、一方で浮体の挙動により加わる繰り返しの機械的曲げ変形(疲労)への対策として、各線心の遮へい層にはワイヤーシールド構造を採用した。その周囲にはポリエチレン防食層と、水分の侵入を防ぐ遮水層を設け、浸水条件下での長期絶縁性能を担保する構造とした。遮水層は耐腐食性及び疲労特性に優れた金属ラミネートテープを採用した。

3 心の電力コアの他に風車などの制御通信を想定した光ファイバークーブルを複合し、それらを覆う外装については、従来の海底ケーブルと同様に鉄線鎧装を設けた。ただし、ケーブルには浮体の挙動に追従した左右の捻れ力が加わることが懸念されることから、捻れ及び外傷対策として、ケーブルの鎧装を二重鉄線交互巻き仕様とした。これらを基に設計されたダイナミックケーブルの構造を図4に示す。

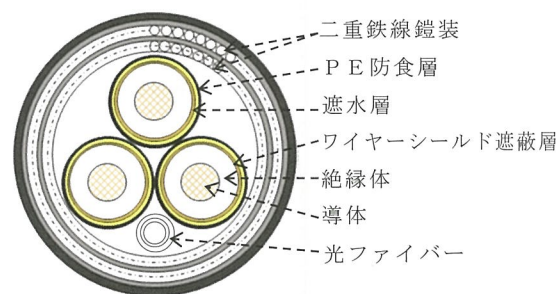


図4 遮水層付きダイナミックケーブル構造

Fig.4 Cross section of dynamic cable

(2) ダイナミックケーブルの布設設計

風車は台風等による暴風が加わることによる移動距離が 40m 程に及ぶことが想定されたため、この移動距離を吸収可能なケーブルオフセット設計を実施した。図5に実証試験向けに検討したオフセット線形を示す。

オフセット線形を維持するために、ケーブルの中間部にはブイを設けた。更に、着底部近傍でケーブルがキンクするのを防ぐために、ブイの位置をワイヤーとシンカーで固定し、その移動範囲を制限することで、ブイからケーブル着底点までの線形変動を抑制した。

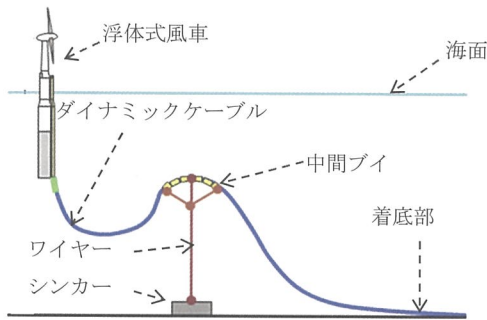


図5 浮体式風車に対応するオフセット線形

Fig.5 Cable laying configuration of dynamic cable system

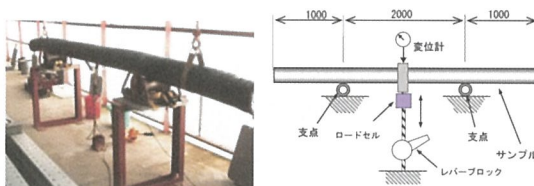
3.3 ダイナミックケーブルの基本特性

(1) ケーブル機械特性の確認

ケーブルの水中挙動に関わる機械特性の検討と測定試験を実施した。確認対象は電気共同研究第61巻第1号などに示される特性のうち、ヤング率、曲げ剛性、捻り剛性、疲労特性の確認試験を実施し、このほかの特性は同文献に記載される計算式を用いて算出した。

実施した確認試験概要を図6に示す。測定方法についても同文献に記載の測定方法を参考に実施した。

＜曲げ剛性＞



＜捻り剛性試験＞

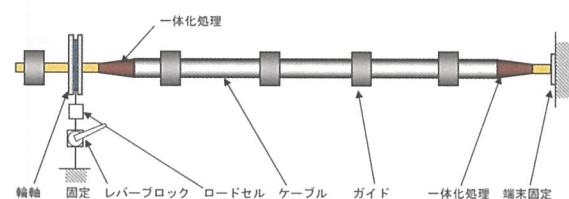


図6 機械特性確認試験概要

Fig.6 Overview of measurement for cable mechanical characteristics

(2) ケーブル着底部挙動模擬試験

ケーブルへ加わる機械力を把握することを目的とし、ケーブル着底部をモデルに、実機ケーブルを用いた強制動揺試験を実施した。図6にケーブル着底

部挙動模擬試験の概要を示す。

強制動揺試験装置を用い、ケーブルの上端部に所定の振幅を与え、鉄線鎧装に加わる歪量を測定した結果、ケーブルの鉄線鎧装に加わる歪量が実用上問題ないことを確認した⁽⁴⁾。

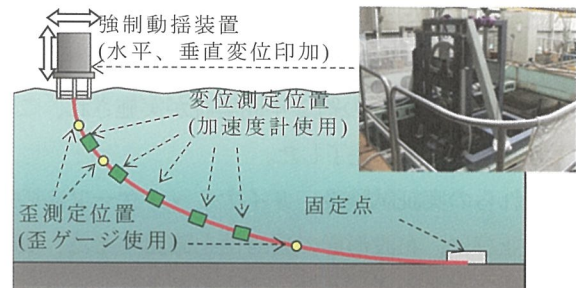


図7 ケーブル着底部模擬試験概要

Fig.7 Profile of Mock Examination

更に、ケーブル線形変動の実測値と、解析ソフトによるケーブル挙動シミュレーションの比較を実施した。

ケーブルの線形変動の実測については、ケーブルが海底と成す角度の変化を、加速度計を用いて測定した。測定結果からケーブルに極端な屈曲は発生しないことを確認した。また、実測値と解析値の角度変化の差もケーブルの線形変動を把握するには十分に小さい値であり、解析の実用性についても確認した。

(3) 実証試験機による施工と撤去品調査

長崎県五島列島杵島沖に設置された実証試験機へ、ケーブル布設作業を実施した。

布設状況を図8に示す。同実証試験で適用されたハイブリッドスパー型の浮体構造へのケーブル布設作業は問題なく実施できることを確認した。



図8 浮体式風車へのケーブル布設状況

Fig.8 Cable installation to floating offshore wind turbine

100kWの実証試験機は2012年7月26日より系統連系を開始し、2013年5月までの約1年間、実証が行われた。途中、大型台風の2度の襲来に見舞われ、浮体は最大で21m移動したが⁽⁵⁾、ダイナミックケーブルはこの大きな繰り返し変位に耐え、無事に実証を完了した⁽⁶⁾。

2MWの実証試験機は2013年10月に発電を開始し、2015年末までの約2年間実証が実施され、この実証試験も無事に完了した。

これらの実証試験後、ダイナミックケーブルの構造、並びに、布設形態の妥当性を確認する為、実証適用後にダイナミックケーブルを撤去し、ケーブルの解体調査を実施した。

一例として、浮体の挙動に伴う曲率変化が大きいケーブル放出点部の調査結果を図9に示す。

繰り返し曲率変化が加わることによるケーブルの損傷が懸念されたが、電力線心、並びに、遮水層に異状は無く、遮水層内部への水分の侵入も認められなかった。

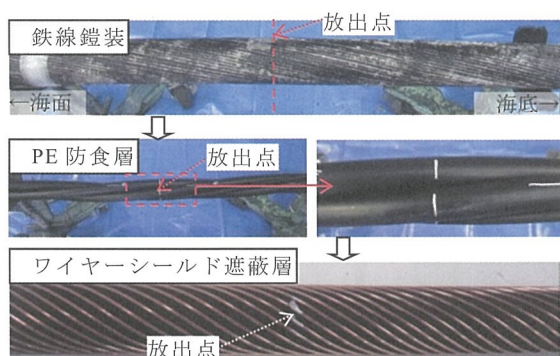


図9 ケーブル解体調査結果

Fig9 The result of disassembling inspection for dynamic cable

4. ケーブル挙動解析技術の開発

4. 1 解析技術の開発について

浮体式洋上風力発電において、ダイナミックケーブルシステムの長期信頼性を評価する為には、ケーブルに加わる機械力を把握する必要がある。海象条件の異なる海域ごとにケーブル挙動を再現するには、ケーブルの挙動解析を行うことが有効であり、我々はケーブルの挙動に特化した解析手法の開発に取り組んだ。

4. 2 解析条件の検討

(1) 挙動解析モデル

解析には開発したダイナミックケーブル構造、布設形態としてはオフセット線形を選定し、浮体からのケーブル放出点、着底部近傍等の、特に機械的損傷が心配される部位に着目し解析を実施した。解析モデルを図10に示す。

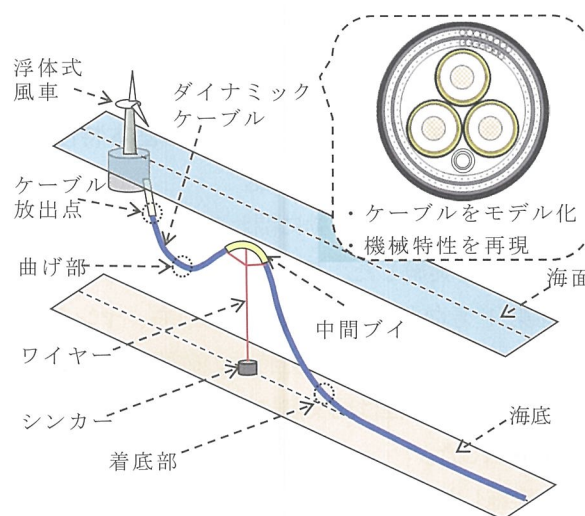


図10 ケーブル挙動解析モデル

Fig.10 Analysis model for dynamic cable system

(2) 解析の手順

ケーブルの構造、並びに、布設形態の設計を実施した後、図11に示す手順に従い、解析を実施した。

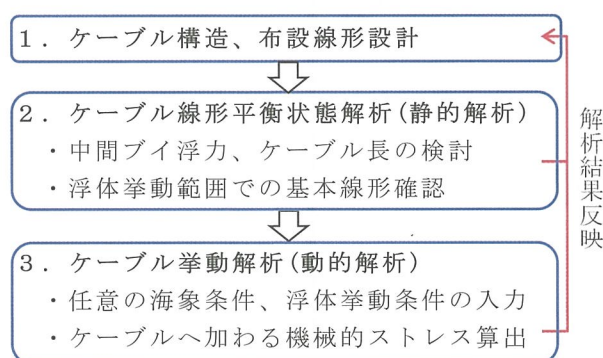


図11 ケーブル挙動解析手順

Fig.11 Analysis flow for Dynamic Cable

4. 3 ケーブル挙動解析結果

(1) ケーブル初期線形平衡状態解析結果

ケーブル重量、浮力、海流等の定常的な外力条件、並びに、ケーブル機械定数を入力し、初期状態

で適切なオフセット線形が形成可能であるか検討した。図 12 に海底ケーブル初期布設形態平衡状態解析結果を示す。

重力、潮流、波等の外力が釣り合うことで、所定のオフセット線形が形成出来ることを確認した。

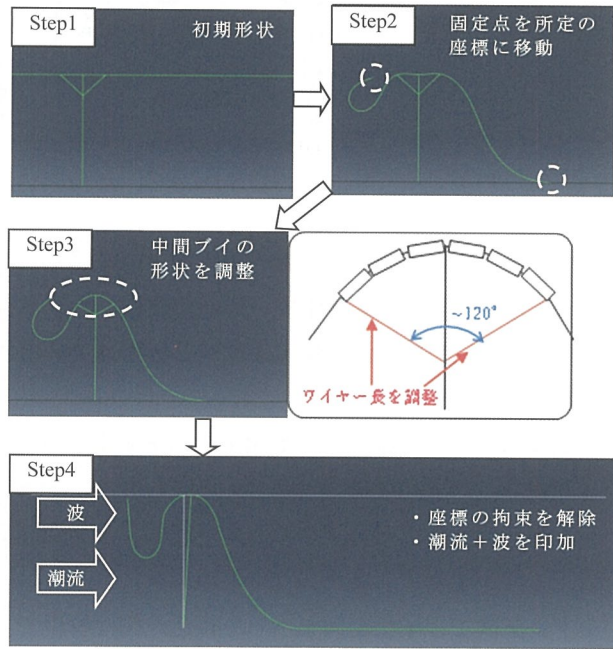


図 12 ケーブル初期線形平衡状態

Fig.12 The result of static analysis

(2) ケーブル挙動解析結果

浮体式洋上風力発電施設の挙動を、ケーブル初期線形平衡状態に加え、線形の変動を解析した結果、浮体の挙動に、海底ケーブルの線形が追従することを確認した。図 13 にケーブル挙動解析結果を示す。

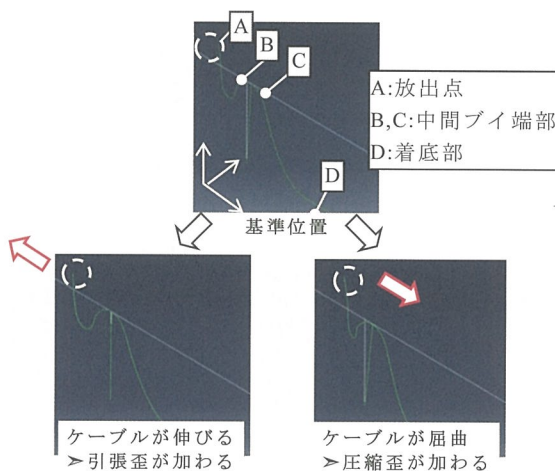


図 13 ケーブル挙動解析結果

Fig.13 The result of dynamic analysis

また、ケーブルに加わる歪量について算出した結果を図 14 に示す。ケーブル懸垂部（図 13 の A-B 間に相当）において、歪量の変動が最大となり、大きく線形が変化することを確認した。これに対して、中間ブイと着底部間（図 13 の C-D 間に相当）の歪量変化は小さく、中間ブイを海底に係留することで、着底部近傍のケーブル線形変動が抑制可能であることを確認した⁽⁷⁾。

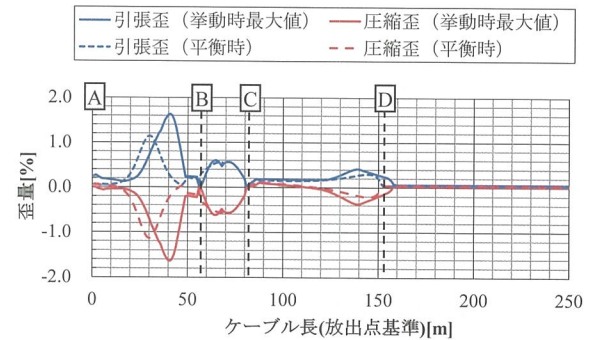


図 14 ケーブル表面における歪量算出結果

Fig.14 The result of strain analysis on cable surface

5. 新技術への展開

5. 1 ケーブル線形の展開

浮体式洋上風力の適用拡大には様々な海象条件、海域への対応が必要となる。課題の一つである水深が浅い海域への対応について、水中のケーブルオフセット形状の変更案を検討した。検討した新形状を図 15 に示す。

水深 50m 程度の比較的浅い海域でケーブルが揺動した場合、ケーブルの海底面への接触や海面への浮上による線形の乱れが懸念され、これらを解消するためにケーブル長を短くすると、挙動に追従できず張力の増大や局所曲げが発生する恐れがある。新形状として緩やかなオフセットを 2 連にする形を検討した。

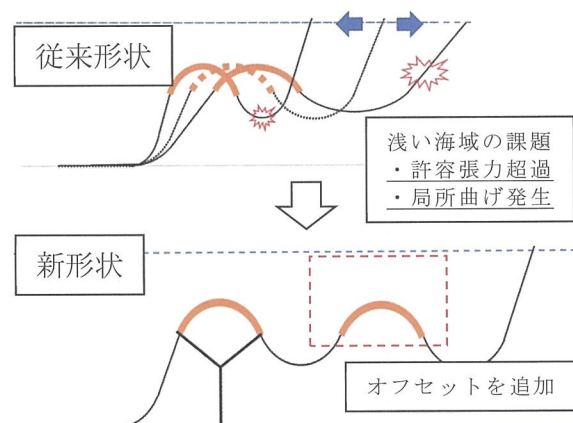


図 15 浅い海域に対応する海中線形

Fig.15 Cable configuration in shallow water

このオフセット形状について特定の海象条件下で解析を行った結果、最大張力は従来形状に比べて約56%減少し、浮体への導入部の曲げモーメントについても約57%減少することを確認した。また、曲げなどによる歪の変化も小さくなることを確認した。このオフセット形状を適用することで、浅い海域においても浮体の挙動に問題なく対応可能であることを確認した。

5. 2 解析技術の評価

(1) ミニモデル試験による評価

開発した解析技術について、その妥当性、信頼性を評価するため、ミニモデルによる比較試験を実施した。試験の概要を図16に示す。

ミニモデル試験については前項で検討した新形状のケーブルオフセットにて実施した。ミニモデルの構造については、海底ケーブルの機械定数と形状を、実海域と実験水槽の比率に併せて調整（縮小）し決定した。浮体に見立てた装置を想定される挙動と同じパターンで変位させ、全体の様子を水中カメラで撮影した。ケーブルの各箇所にもマーカーを設け、その位置からミニモデルケーブルの挙動を測定した。

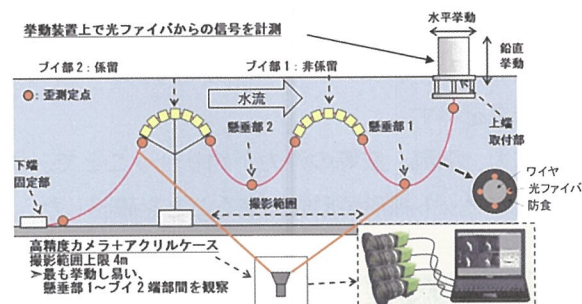


図 16 ミニモデル試験概要

Fig.16 Profile of experiment by miniature model

ケーブルの挙動確認結果の一例を図17に示す。図17に示す結果はオフセット形状の真横、つまり図15の紙面方向に波や潮流を印可した条件での内容を示す。

図17のグラフは、上図はオフセットを真上から見た線形、中央図は真横（図15と同じ方向）から見た線形、下図はケーブルの曲率半径の長手方向位置での変化を示す。またグラフ中の赤色凡例はミニモデル試験での挙動範囲を示し、緑色凡例は解析での挙動範囲を示す。

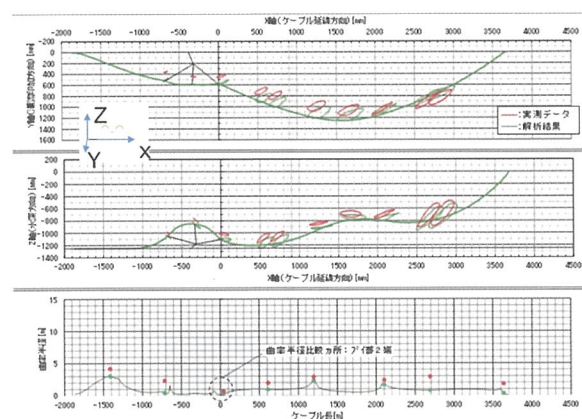


図 17 ミニモデル試験結果

Fig.17 Experimental result by miniature model

解析結果とミニモデル試験結果を比較すると、全体的な挙動の傾向は一致していることを確認した。僅かな差は認められたが、ミニモデルの挙動が比較的小さく、解析においては厳しい判定評価がなされているものと考えた。

(2) 実機での線形比較

ミニモデル評価を実施した線形について、実際のケーブル/ブイシステムを実海域に布設しその形状の確認を実施した。結果を図 18 に示す。赤色線は実機での確認結果を示し、黒色点線は解析での線形を示す。

実機での確認結果はケーブルのマーキング位置を参考に、ROV による水中測位結果をケーブル位置としてプロットした。

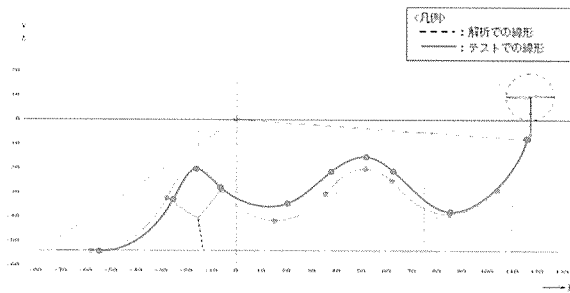


図 18 実海域でのケーブル線形確認

Fig.18 Actual laying configuration of dynamic cable on site

解析結果と実機試験結果を比較すると、全体的な線形は一致していることを確認した。僅かな差は認められたが、この差はブイ周辺で生じていることから、実機のケーブルやブイの重量及び浮力が、解析で入力した設計値とは異なり、製造公差含んでいることが差異の要因と考えた。

解析においては挙動範囲や各条件設定を広く設定することで問題なく適用可能と評価した。

6. まとめ

適用の拡大が期待される浮体式洋上風力向けのダイナミックケーブル及びシステムの検討、開発を行い、その評価手法や適用拡大に向けた技術開発を完了した。今後は、更なる適用拡大に向けた課題としてケーブルサイズ拡大への対応や、コスト低減を目標とした新たなブイシステムの開発を進め、安定した送電システムをより高品質、低コストな形で提案する事で、風力等の再生可能エネルギーの拡大へ貢献したい。

参考文献

- (1) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)
“NEDO 再生可能エネルギー技術白書” 第2版、第3章風力発電
- (2) 住友電気工業株式会社 プレスリリース “日本初、大型商用洋上風力発電事業「秋田港・能代港洋上風力発電施設建設工事」本格着工” 2020年3月
- (3) 長谷川隆章, 井上俊司, 宇都正太郎, 石田茂資, 藤原智, “洋上浮体からの電力送電システムに関する技術開発計画,” 日本船舶海洋工学会講演論文集 11号、ROMBUNNO.2010E-OS2-9、Nov.2010
- (4) R.Taninoki, D.Azuma, I.Sato, T.Utsunomiya, S.Ishida, K.Kokubun, “Development of Dynamic Cable System for Floating Off-shore Wind Power,” CIGRE AORC Technical meeting 2014, no.B1-1037, Tokyo, Japan, May.2014
- (5) S.Ishida, K.Kokubun, T.Nimura, T.Utsunomiya, I.Sato, S.Yoshida, “AT-SEA EXPERIMENT OF A HYBRIDTYPE OFFSHORE WIND TURBINE,” OMAE2013-10655, Nov.2013
- (6) 谷之木良太, 阿部和俊, 東大介, 佐藤郁, 宇都宮智昭, 石田茂資, 國分健太郎, “浮体式洋上風力発電用ダイナミックケーブルシステムの開発,” 2014 電気学会全国大会, 分冊 7, no.7-116, pp.184-185, Mar.2014
- (7) 谷之木良太, 阿部和俊, 助川琢也, 東大介, “浮体式洋上風力発電向けケーブル挙動解析手法の開発,” 2016 電気学会全国大会, 分冊 7, no.7-142, pp.222-223, Mar.2016

(2020年6月26日 受理)

著者略歴



鈴木 孝幸(すずき たかゆき)

2007年3月名古屋工業大学大学院 機能工学専攻修了。同年4月住友電気工業株式会社入社。主として地中送電ケーブル工事の施工管理、工法開発等に従事。2012年より地中送電ケーブルの設計等に従事し、現在は洋上風力向け海底ケーブルの設計等に従事。電気学会。



阿部 和俊(あべ かずとし)

1985年3月山形大学 電気工学科卒業。同年4月日立電線株式会社入社。主として地中送電ケーブルの設計、開発等に従事。2014年4月住友電気工業株式会社入社。現在は、電力ケーブルの設計、開発、プロジェクト管理に従事。電気学会。



助川 琢也(すけがわ たくや)

1994年3月芝浦工業大学 電気工学科卒業。同年4月日立電線株式会社入社。主として地中送電ケーブル接続部の設計、開発等に従事。2014年4月住友電気工業株式会社入社。現在は、地中送電ケーブル接続部の開発に従事。電気学会。



東 大介(あずま だいすけ)

2006年3月近畿大学 理工学部卒業。2007年ジェイ・パワーシステムズ入社。主として地中・海底ケーブル工事の設計・施工管理に従事。2014年より住友電気工業株式会社入社。現在は海底ケーブル工事の設計・施工管理に従事。



西川 正利(にしかわ まさとし)

2008年3月大阪府立大学大学院 電子・数物系修了。同年4月住友電気工業株式会社入社。主として地中送配電、海底ケーブルの設計等に従事し、現在は海外向け輸出ケーブルの設計、技術交渉等に従事。



谷之木 良太(たにのき りょうた)

2010年3月横浜国立大学大学院 物理情報工学専攻修了。同年4月日立電線株式会社入社。2014年4月住友電気工業株式会社入社。主として電力ケーブル、及び、その工法開発に従事し、現在は電力ケーブルの品質保証業務に従事。電気学会。