



浮体式洋上風力発電用ダイナミックケーブル

Dynamic Cable System for Floating Offshore Wind Power Generation

谷之木 良太*
Ryota Taninoki

阿部 和俊
Kazutoshi Abe

助川 琢也
Takuya Sukegawa

東 大介
Daisuke Azuma

西川 正利
Masatoshi Nishikawa

沿岸海域の水深が深い日本において、浮体式洋上風力発電への関心が高まっている。当該発電方式において、安定した送電を実現する、ダイナミックケーブルシステムを開発し、環境省による浮体式洋上風力発電実証事業へ適用した結果、当社のケーブルは試験期間中問題なく運用された。ケーブルの撤去後の解体調査でも、各部位に顕著な劣化は見られず、当社のダイナミックケーブルシステムが、ハイブリッドスパー型浮体式洋上風力発電においてケーブルに加わる機械的応力に、十分耐え得る性能を有することを確認した。また、ダイナミックケーブルの長期信頼性を担保する為に、海中におけるケーブルの挙動に特化した解析技術の開発に取り組み、所定の海象条件下でケーブルの線形変動を把握可能な解析技術を確認し、浮体式洋上風力発電におけるケーブル布設形態の最適化を可能とした。

Floating offshore wind power generation has attracted increasing attention because of the deep water levels around Japan. We have developed a dynamic cable system that stably transmits electric power from floating offshore wind turbines to a substation on land, and tested it in a demonstration project led by the Japanese Ministry of the Environment. During the demonstration, no problems occurred with the cable system, and a subsequent investigation found no remarkable deterioration. These results confirmed that the cable system withstands mechanical stress caused by the large displacement of hybrid spar-type floaters. We have also developed method to analyze the behavior of the cable in the sea to optimize the cable installation design and ensure long-term reliability.

キーワード：洋上風力発電、海底ケーブル、ダイナミックケーブル

1. 緒言

近年、地球温暖化対策としての再生可能エネルギーの導入により、洋上風力発電^{*1}への関心が高まっている。

沿岸海域の水深が深い日本では、海面に風車を浮かべる浮体式洋上風力発電が注目されており、環境省により、国内初となる浮体式洋上風力発電実証事業が実施された。

筆者らは、比較的変位の大きい浮体式洋上風力発電施設から陸地へ、安定した送電を実現する、ダイナミックケーブルシステムを開発し、本実証事業へ適用した。

本稿では、100kW小規模試験機及び、2MW実証機による実証に向けた、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。

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。

環境省実証事業の実施海域を図2に示す。

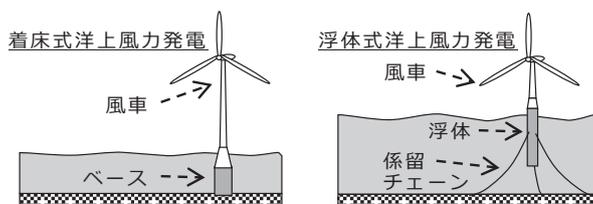


図1 洋上風力発電の概要

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、2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、海底に風力発電設備を固定する着床式洋上風力発電の設置場所が限られるため、海面に風力発電設備を浮かべる浮体式洋上風力発電が注目されている。

浮体式洋上風力発電は世界的に実証段階であり、実用化の検討が進められている。

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

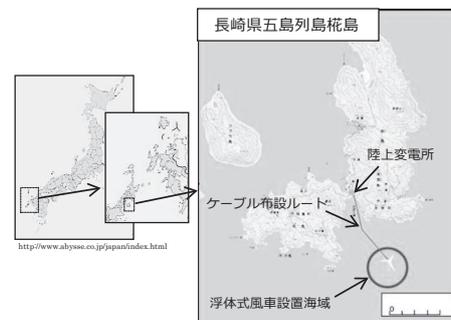


図2 環境省実証事業実施海域

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。故に、ケーブルには潮流や浮体挙動に伴う曲げ、捻れ等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⁽¹⁾。

よって、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。

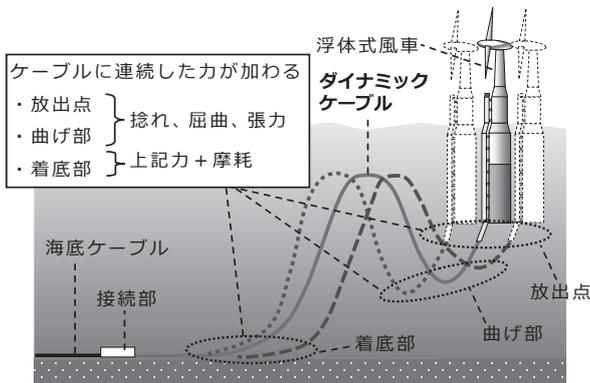


図3 浮体式洋上風力発電施設へのケーブル接続例

3-2 100kW小規模試験機に向けた開発

(1) 小規模試験機におけるケーブル構造

電力ケーブルは、発電機容量、並びに、連携する陸上部の系統電圧を考慮し、6.6kV級3心CVケーブルを選定した。

また、ケーブルには浮体の挙動に追随した左右の捻れ力が加わり、さらには海中浮遊物による主絶縁への外傷、着底部での永続的な繰返し摩耗等が加わる懸念がある。そこで今回、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^{*2}仕様とした。

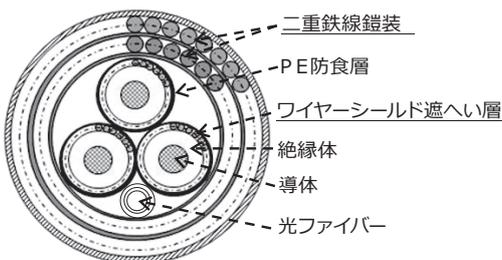


図4 二重鉄線鎧装付3心CVケーブル構造

更に、浮体の繰り返しの挙動により遮へい層へ加わる疲労への対策として、ワイヤーシールド遮へい層^{*3}を採用した。**図4**に二重鉄線鎧装付3心CVケーブルの構造を示す。

(2) 小規模試験機におけるケーブル布設設計

小規模試験機において、台風等による暴風条件下での浮体移動距離が±25mと想定されたため、この浮体移動距離を吸収可能なケーブルオフセット設計^{*4}を実施した。**図5**に小規模試験機に対応する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部までの線形変動を抑制した。

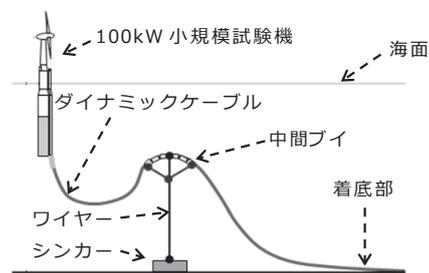


図5 小規模試験機に対応するオフセット線形

(3) 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、試験条件を表1に示す。本試験には海上技術安全研究所殿が所有する中水槽を使用した。

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、鉄線鎧装に加わるひずみ量を測定した結果、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⁾。

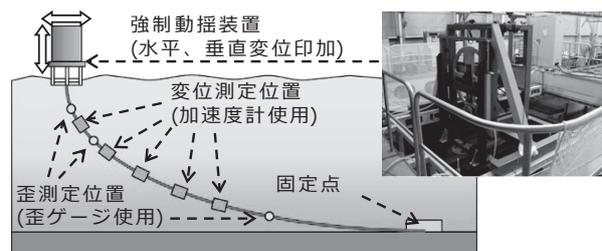


図6 ケーブル着底部挙動模擬試験概要

表1 ケーブル着底部模擬試験条件

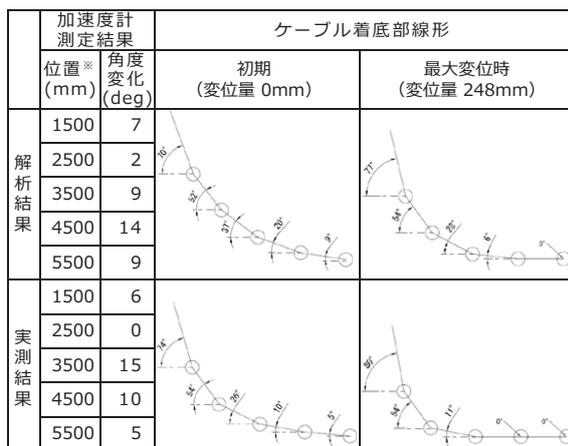
挙動条件	方向	—	垂直	水平
	周期	sec	3 - 20	3 - 20
	振幅	mm	10 - 248	30 - 130
歪量 測定位置*		mm	1000	
		mm	3000	
		mm	8500	
変位 測定位置*		mm	1500	
		mm	2500	
		mm	3500	
		mm	4500	
		mm	5500	

※…ケーブル上端部取付部を基準 (0mm) とする

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。ケーブル着底部線形変動測定結果を図7に示す。

ケーブルに極端な屈曲は発生せず、また、実測値と解析値の角度変化の差は最大で6°と、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、解析の実用性を確認することができた。



※…ケーブル上端部取付部を基準 (0mm) とする

図7 ケーブル着底部線形変動測定結果

(4) 小規模試験機による実証結果

長崎県五島列島杵島沖に設置された小規模試験機から、杵島受変電所間の約2kmにケーブルを布設した。布設状況を写真1に示す。その後、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、超大型台風15号、16号の襲来に見舞われ、浮体は最大で21m移動したが⁽²⁾、ダイナミックケーブルはこの大きな繰返し変位に耐え、異常なく運用でき無事に実証を完了した⁽³⁾。



写真1 100kW小規模試験機へのケーブル布設状況

ハイブリッドスパー型の浮体構造において、ケーブル布設作業が問題なく実施できることを確認した。

3-3 2MW実証機に向けた開発

(1) 実証機におけるケーブル構造

2MW実証機に適用するケーブルの種類として、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、主絶縁の周囲に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。

また、遮水層は耐腐食性及び疲労特性に優れたものとした。図8に遮水層付きダイナミックケーブルの構造を示す。

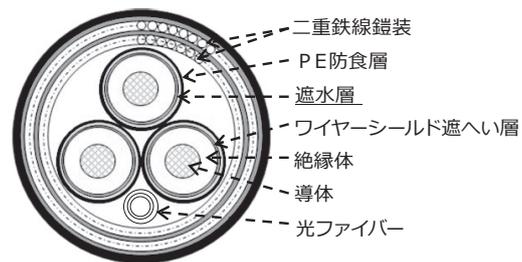


図8 遮水層付きダイナミックケーブル構造

(2) 実証機におけるケーブル布設計画

小規模試験機から実証機への入れ替えに合わせ、既設ケーブルの一部を撤去し、遮水層付ダイナミックケーブルを割り入れる検討を実施した。図9に2MW実証機へのケーブル布設概念図を示す。

浮体の設計シミュレーション結果から、実証機の最大移動距離は±40mと計算され、これを吸収可能なケーブル線形とした。

(3) 実証機による実証結果

小規模試験機の撤去に合わせ、風車近傍の既設ケーブルを一部撤去した後にダイナミックケーブルと接続し、所定の線形を形成しながら係留が完了した風車へケーブルを布設した。写真2に実証機へのケーブル布設状況を示す。

洋上での既設ケーブルとの接続作業を含むケーブル布設

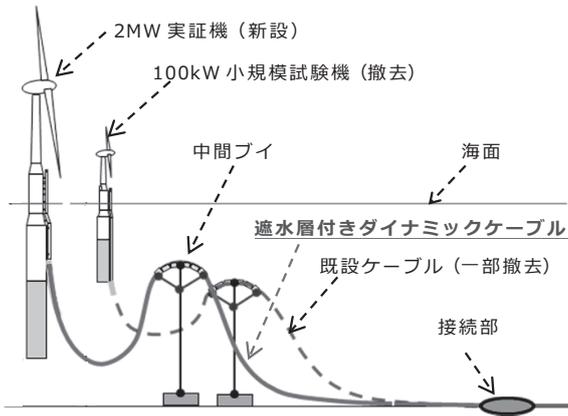


図9 2MW実証機へのケーブル布設概念図

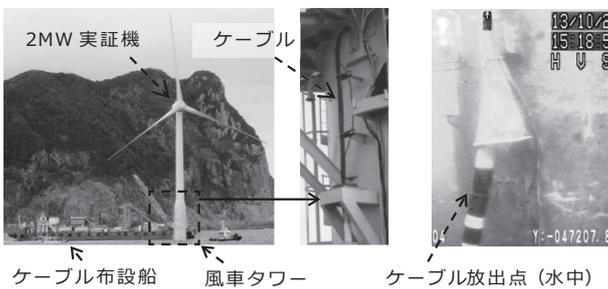


写真2 2MW実証機へのケーブル布設状況

作業を無事に完了した。工事完了後、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た。ダイナミックケーブルは実証期間中、問題なく運用され、無事に実証を完了した。

(4) ケーブル解体調査結果

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ため、実証適用後に撤去されたダイナミックケーブルの解体調査を実施した。

一例として、浮体の挙動に伴い曲率が大きく変化するケーブル放出点部の解体調査結果を写真3に示す。

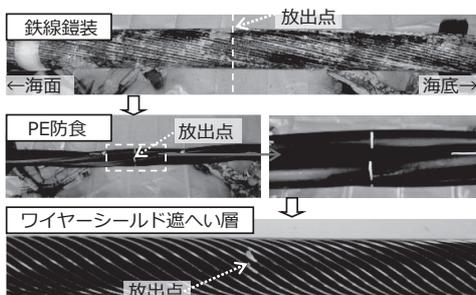


写真3 ケーブル解体調査結果

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、遮水層に異常はなく、遮水層内部への水分の侵入も認められなかった。

以上の結果から、当社のダイナミックケーブルは、浮体式洋上風力発電において、ケーブルに加わる機械的応力に十分耐え得る性能を有し、また、ケーブル布設形態に採用したオフセット線形が機械適応力を吸収するのに適した構造であることが確認された。

4. ケーブル挙動解析技術の開発

4-1 ケーブル長期信頼性評価のための課題

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ためには、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、ケーブルの挙動解析を行うのが有効であり、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

解析に用いるケーブルには遮水層付きダイナミックケーブルを選定した。

また、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。

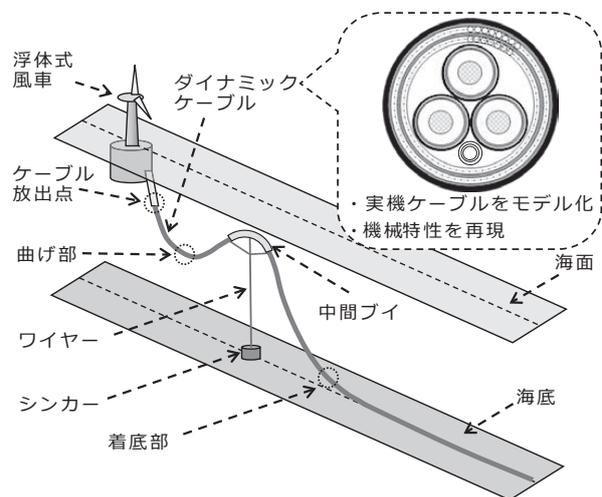


図10 ケーブル挙動解析モデル

(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。

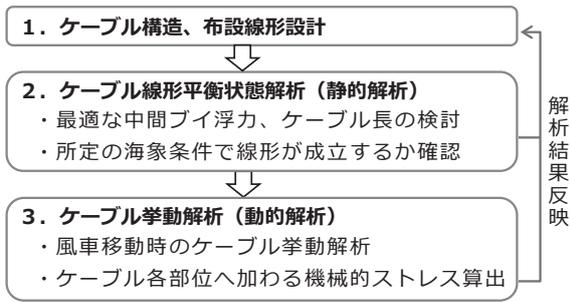


図11 ケーブル挙動解析手順

4-3 ケーブル挙動解析結果

(1) ケーブル初期布設形態平衡状態解析結果

ケーブル重量、浮力、海流等の外力条件、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できることを確認した。

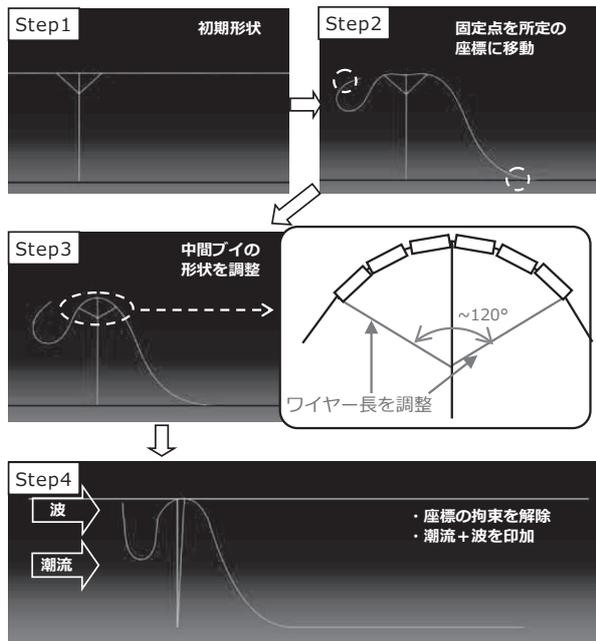


図12 ケーブル初期布設形態平衡状態

(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、ケーブル初期布設形態平衡状態に加え、線形の変動を解析した結果、浮体の挙動に、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。

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。

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が確認できた⁽⁵⁾。

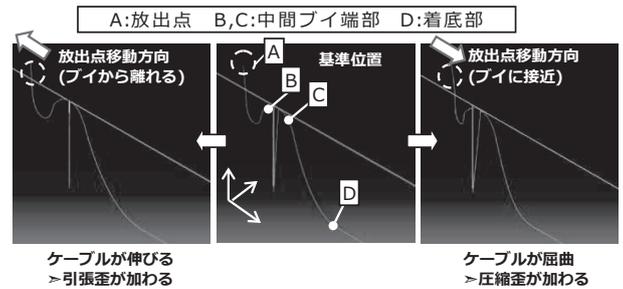


図13 ケーブル挙動解析結果

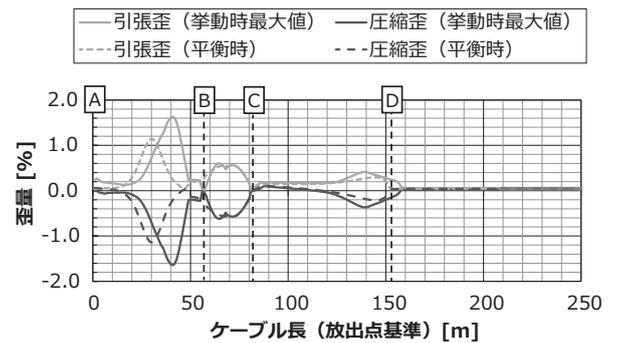


図14 ケーブル表面における歪量算出結果

5. 結 言

今後は、2MW実証機実証事業、及びモデル検証での各種挙動データを用い、ケーブル構造及び布設設計の信頼性を検討する予定である。また、今回開発したケーブル挙動解析技術を用いて、ケーブル布設形態の最適化を実施していく。

これらの各種検討結果をダイナミックケーブルシステムに反映し、安定した送電システムを提案することで、風力等の再生可能エネルギーの拡大へ貢献したい。

6. 謝 辞

最後に、環境省による浮体式洋上風力発電実証事業での実証、各種データ等をご提供頂くと共に、ご指導を頂いた

戸田建設(株)殿、九州大学殿、海上技術安全研究所殿の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

用語集

※1 洋上風力発電

風力発電とは風の力で風車を回転させ、その回転で発電機を回し風力を電力に変換する発電方式である。洋上風力発電とは海洋上にて風力発電を実施する発電方式であり、洋上では陸上に比べ安定して強い風が吹くことから、より大きな電力を発電できる。

※2 二重鉄線交互巻き

鉄線鎧装とは海底ケーブルに固有の構成層であり、ケーブル布設時の耐張力性の確保、錨や漁具による外傷からの防護の役割を担う。二重鉄線交互巻きとは、鉄線を内と外で逆方向に巻き付ける構造をとる。その構造には、ケーブルの左右の捻れやすさ(捻り剛性)を均等にする効果がある。

※3 ワイヤースールド遮へい層

遮へい層の役割は以下のとおりである。

- ・絶縁体へ加わる電界の方向を均一にすることで耐電圧特性を高める
- ・ケーブル終端部で接地することにより感電を防止する
- ・事故時に発生した地絡電流を大地へ流す

ワイヤースールドとは、ケーブルコア上に銅ワイヤを螺旋状に巻き付けた構造をとる。その構造には、ケーブルに曲げを加えた際に遮へい層に加わる伸縮を吸収する効果がある。

※4 オフセット設計

ケーブルをS字状に布設し弛ませ、浮体式風車の移動をケーブル弛み部の余長で吸収する設計のこと。

参考文献

- (1) 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、ROMBUN NO.2010E-OS2-9 (Nov. 2010)]
- (2) S. Ishida, K. Kokubun, T. Nimura, T. Utsunomiya, I. Sato, S. Yoshida, "AT-SEA EXPERIMENT OF A HYBRID TYPE OFFSHORE WIND TURBINE," OMAE2013-10655 (Nov. 2013)
- (3) 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)]
- (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) 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)]

執筆者

谷之木良太* : 電力技術開発部



阿部 和俊 : 電力事業部 部長



助川 琢也 : 電力技術開発部 グループ長



東 大介 : 電力エンジニアリング事業部



西川 正利 : 電力事業部



*主執筆者