

浮体式洋上風力発電の維持管理コストに関する研究*

Assessment of operation and maintenance cost for floating offshore wind farms

菊地 由佳**
Yuka KIKUCHI

吉村 豊**
Yutaka YOSHIMURA

石原 孟**
Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

浮体式洋上風力発電の導入拡大に向けて、維持管理コストの低減が求められている。維持管理コストの評価には、維持管理コストモデル¹⁾に基づくモンテカルロ法を用いた離散事象シミュレーションが一般的に用いられる²⁾。また、維持管理コストの評価には、故障率、ダウンタイム、コストに関する維持管理データベースが必要となる。陸上風力発電においては、菊地ら³⁾が国内の風力発電機の故障データベースを基に信頼性分析を行い、故障率、故障復旧ダウンタイム・故障復旧コストを分析したが、浮体式洋上風力発電については実績が少なく故障データが存在しない。2022～2023 年度に実施されたグリーンイノベーション基金事業では、維持管理コスト低減のための技術開発が行われた^{4,5)}。これらの個々の技術が、維持管理コスト低減に与える影響を定量的に評価する必要がある。

本研究では、維持管理コストモデルを構築し、モンテカルロ法を用いた離散事象シミュレーションプログラムを開発する。次に、既往の浮体式海洋構造物および国内の洋上風力発電所の実証研究等を文献調査し、浮体式洋上風力発電所に関する維持管理データベースを構築する。最後に、構築した故障データベースおよび離散事象シミュレーションを用いて、浮体式洋上風力発電の維持管理コストを評価し、実証試験のデータを用いて検証するとともに、商用期の浮体式洋上風力発電所の維持管理コストを評価する。

2. 維持管理コストモデル

本研究で構築した維持管理コストモデルの入力変数を表 1 に示す。維持管理コストモデルの評価式を各々示す。

表 1 維持管理コストモデルの入力変数

入力条件	記号
風車基数	N_{WT}
定格出力	P_{WT}
水深	h_w
離岸距離	d_{shore}
組立港と基地港との距離	$d_{port,WT}$
組立港と発電所との距離	$d_{port,FS}$
送電線の本数	N_{EX}
送電線距離	d_{power}

浮体式洋上風力発電所における維持管理費 $OPEX$ は文献 1) を参考に次式で示すように評価される。

$$OPEX = C_{OP} + C_S + C_R \quad (1)$$

ここで、 C_{OP} は運転管理費、 C_S は定期点検費、 C_R は修理費である。以下に各コストの詳細について述べる。

運転管理費 C_{OP} はオペレーションコントロール、港湾関連費等を含み、発電所規模の比例関数とした。

$$C_{OP} = c_{OP} P_{WT} N_{WT} \quad (2)$$

ここで、 c_{OP} は 1MW あたりの運転管理費を表す。

定期点検費は文献 6) を参考に次式の通り算出する。

$$C_S = \sum_{i=1}^7 C_{S,i} \quad (3)$$

$$C_{S,i} = \frac{\sum_j N_{S,i,j} (C_{M\&R,vessel,i,j} + N_{S,P,i,j} C_{S\&R,P}) \left[\frac{T_{S,i,j}}{T_{S\&R,hours}} \right]}{\alpha_{S,i,j} + C_{S\&R,C,i,j}}$$

$C_{S,i}$ はコンポーネント i (係留設備、風車、浮体、IA ケーブル、送電ケーブル、陸上変電所、洋上変電所) における定期点検費である。コンポーネント i の点検種別 j (定期点検等) において、 $N_{S,i,j}$ はメンテナンス点検頻度、 $C_{M\&R,vessel,i,j}$ は傭船費、 $N_{S,P,i,j}$ はメンテナンス点検作業員数、 $C_{S\&R,P}$ は作業員単価、 $T_{S,i,j}$ は点検時間、 $T_{S\&R,hours}$ は 1 日の就業時間、 $\alpha_{S,i,j}$ は稼働率、 $C_{S\&R,C,i,j}$ は整備時の部品費である。

修理費は文献 6) を参考に次式の通り算出する。

*令和 6 年 11 月 29 日第 46 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 東京大学大学院工学系研究科
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

$$C_R = \sum_{i=1}^7 C_{R,i} \quad (4)$$

$$C_{R,i} = \frac{\sum_{k=1}^7 \lambda_{R,i,k} (C_{S\&R,vessel,i,k} + N_{R,i,k} C_{S\&R,P}) \left[\frac{T_{R,i,k}}{T_{S\&R,hours}} \right] + C_{S\&R,C,i,k}}{\alpha_{R,i,k}}$$

ここで、 $C_{R,i}$ はコンポーネント*i*の修理費である。コンポーネント*i*の FTC 値*k*において、 $\lambda_{R,i,k}$ は故障率、 $N_{R,P,i,k}$ は作業員数、 $T_{R,i,k}$ は修理時間、 $\alpha_{R,i,k}$ は稼働率、 $C_{S\&R,C,i,k}$ は修理用部品費である。

構築したコスト構造を基に、モンテカルロ法を用いた離散事象シミュレーションプログラムを構築した。風車の故障を入力した故障率を基にポアソン過程で記述し、保全作業を時間領域モンテカルロ法によりシミュレーションする。この時、風速と波高の時系列を入力することにより稼働率を考慮した。

3. 維持管理データベースの構築

3.1 故障率データベースの構築

維持管理データベースを、故障タイプクラス (FTC) 毎に整理した。故障率 $\lambda_{R,i,k}$ について、風車の故障率は、Carrollらの論文⁷⁾に掲載されている着床式洋上風力発電所の故障率基に設定した。しかし、増速機の全交換および発電機の全交換は故障率が高く、着床式洋上風力発電の開発初期に発生したトラブルを反映していると考えられるため、今後の調査を必要とする。参考に、大型部品について、国内の陸上風力発電機の故障率³⁾と海外の着床式洋上風力発電機の故障率とを比較した結果を図1に示す。

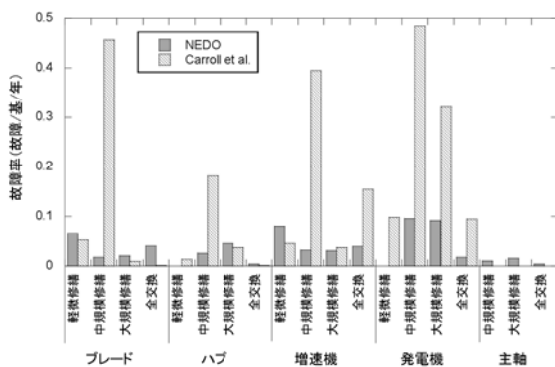


図1 国内の陸上故障データと洋上故障データとの比較

浮体の故障率は、海洋石油・ガス生産設備の故障率を評価した Bhardwaj らによる論文⁸⁾を用いた。定位置で用いられる MODU (Mobile Offshore Drilling Unit)・MOPU (Mobile Offshore Production Unit) の支柱や梯子等の付帯設備の損傷および本体設備の損傷に関する故障

率を、浮体式洋上風力発電の故障率として転用した。本体設備の故障率のうち、浮体式洋上風力発電にはない曳航・引網等の故障モードは除外している。

係留設備の故障率は、海洋石油ガス開発関連技術における係留設備の事故に関する報告⁹⁾から、係留設備交換にあたるシングルラインとマルチラインの故障率の和 1.52%/年・設備を適用した。

洋上変電所の故障率は、国内の陸上変電設備について経済産業省電気保安統計¹⁰⁾の事故データより、2008年度から2020年度の故障率を評価し、図2に示すように平均値の 0.006 件/年/基とした。ここで、図中に丸印で示す東日本大震災が発生した2010年度および2011年度は除外した。

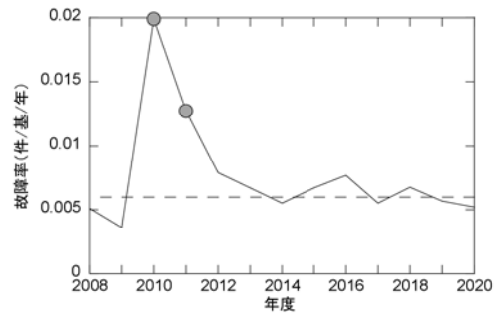


図2 国内変電所の故障率の推移

送電ケーブルの故障率は、CIGRE(XLPE)2020 報告値¹¹⁾より、2006 年から 2015 年の送電ケーブル 1059km に対して評価された 0.0018 件/km/年を用いた。

アレイケーブルの故障率は、4C offshore データベース¹²⁾に掲載されている洋上風力発電所における故障記録を用い、2017~2023 年、6 箇所の浮体式洋上風力発電所、26 基の浮体式風車において敷設された総延長 72km を対象に分析し、0.00781 件/km/年、0.0179 件/ライン/年と評価した。なお、福島沖実証研究で発生した海洋生物付着は、海洋生物付着を抑制するケーブル開発が行われているため、故障モードに考慮しなかった。

3.2 ダウンタイムとコストデータベースの構築

ダウンタイムは、故障修理時間 $T_{R,i,k}$ と定期点検時間 $T_{S,i,j}$ に区分される。風車の修理時間は、Carroll 等の論文の値⁷⁾を用いた。浮体の修理時間は福島実証研究の報告書¹³⁾を参照した。係留索、電気設備の修理時間は、欧州の文献¹⁴⁾を引用した。定期点検の頻度・点検時間については、具体的な点検の仕様と実績のある福島実証研究のデータ¹³⁾を基に設定した。

部品費 $C_{S\&R,C,i,j}$ は風車についてCarroll等の論文の値を採用し、記載のない主軸・ベアリングについてはWalgemの論文¹⁵⁾の値を採用した。浮体、係留索、送電

表2 浮体式洋上風力発電所のBOPの故障データベース

故障タイプクラス	故障率	調達時間	修理時間	部品費
浮体付帯設備故障	0.0397 故障/基/年	0 時間	32 時間	0 万円
浮体本体故障	0.0271 故障/基/年	48 時間	56 時間	504 万円
係留索故障	0.0152 故障/基/年	336 時間	360 時間	8,000 万円/本
アレイケーブル故障	0.0179 故障/基/年	336 時間	696 時間	40,200 万円/km
送電ケーブル故障	0.0018 故障/基/年	336 時間	696 時間	2,750 万円/km
洋上変電所故障	0.0060 故障/基/年	0 時間	8 時間	28 万円

ケーブルとインターアレイケーブルの部品費は、福島実証研究¹³⁾における建設時の報告を基に算定した。労務費 $C_{S\&R,P}$ は欧州文献¹⁴⁾の単価を採用した。備船費 $C_{S\&R,vessel,i,j}$ に関して、大型修理の備船料については、スパー型浮体式洋上風力発電所の建設費評価¹⁶⁾で用いられた建設時の船団構成及び備船料を適用した。アクセス船は、欧州文献¹⁴⁾の単価を採用した。運転管理費 C_{OP} に関しては、福島実証研究における事業性検討に関する報告¹³⁾と英国で報告されている浮体式洋上風力ウィンドファームのガイドライン¹⁷⁾を基に保険費を除いたものとして 0.26 万円/kW/年を設定した。以上のように、各コストは欧州の文献から評価したため、国内外の価格差 1.3 倍¹⁸⁾を考慮した。

構築した維持管理データベースのうち浮体、係留索、電気設備からなる BOP (Balance of plant) の故障に関する値を表 2 にまとめる。

4. 維持管理コストの評価

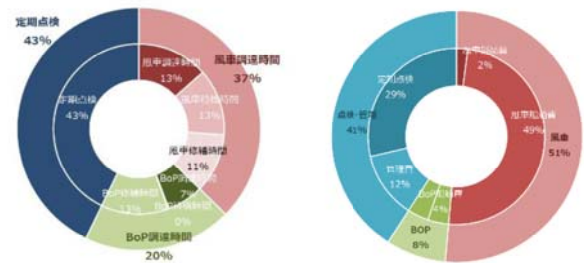
維持管理コスト評価の妥当性を確認するため、福島沖浮体式洋上風力発電システム実証研究における 5MW 風車を対象に、構築したデータベースとコストモデルを用い、ダウンタイムと維持管理コストを評価した。予測したダウンタイムおよび維持管理コストは、それぞれ 822 時間/基/年、2.84 万円/kW/年となった。実績値については、ダウンタイムは公表されておらず、維持管理コストは 3.3 万円/kW/年となっており、評価の妥当性が確認された。

本研究では、銚子沖沖合 30km に位置する仮想的な浮体式洋上風力発電所を対象に、維持管理コストを評価するとともに、最新技術によるコスト低減効果を定量的に評価した。仮想的な発電所の設定値を表 3 に示す。商用期を見据え、15MW 風車 25 基からなる発電所を想定した。構築したデータベースを用いた維持管理をベースラインモデルとして予測したダウンタイムは 1020 時間、維持管理コストは 3.06 万円/kW となった。図 3

す。定期点検によってダウンタイムの 43%、維持管理コストの 41%が占められている。

表3 仮想的な発電所の設定値

項目	値	単位
風車基数	25	基
定格出力	15	MW
水深	200	m
離岸距離	30	km
基地湾からの距離	30	km
組立地と基地港との距離	29	km
組立地と発電所との距離	308	km
送電線の本数	1	line
送電線距離	35	km



(a) ダウンタイム

(b) 維持管理コスト

図3 ベースラインモデルにおける予測値の内訳

グリーンイノベーション基金事業において提案された新しい維持管理手法^{3),4)}による維持管理コスト低減効果を評価する。事業で報告された各技術が維持管理手法に与える影響について表 4 にまとめた。風車について、ナセル内部点検の遠隔作業技術の提案⁴⁾により、月次点検を遠隔で実施可能とした。また、ロボットセンシングを用いた風車の健全性分析技術⁴⁾により、事前に風車の状態を評価することにより、半年点検および 1 年点検の点検時間を短縮可能とした。ドローンによるブレード等風車外部点検技術⁴⁾の評価により 1 年点検の点検時間を短縮可能とした。浮体と係留系・ダイナミックケーブルについて、従来用いられていた ROV

に対して、超小型 ROV を用いた海中構造部の点検手法³⁾が開発された。これにより、作業船を大型船から小型船に変更することが可能となる。

表 4 最新技術による維持管理手法

項目		従来	最新技術
風車	月次点検時間	10 時間	0 時間
	半年点検時間	16 時間	8 時間
	1 年点検時間	24 時間	8 時間
BOP	定期点検における備船費	1,365 万円/日	260 万円/日

構築したデータベースとシミュレーションにより、表 4 に示した従来手法と最新技術を適用した場合の維持管理コストを評価した結果を表 5 に示す。運転管理費については、浮体と係留設備にそれぞれ 50% ずつ割り振っている。その結果、維持管理コストについて、風車では 20%、浮体 22%、係留設備 33%、ケーブル 21% とそれぞれ低減し、発電設備全体では 22% 低減することが分かった。

表 5 従来技術と最新技術による維持管理コストの評価

項目	コスト (万円/kW)		低減率(%)
	従来	最新技術	
風車	2.03	1.63	20
浮体	0.45	0.35	22
係留設備	0.30	0.20	33
ケーブル	0.28	0.22	21
洋上変電所	0.00	0.00	0
合計	3.06	2.40	22

5. まとめ

本研究では、浮体式洋上風力発電の維持管理コストを評価し以下の結論を得た。

- (1) 維持管理コストモデルを構築し、モンテカルロ法を用いた離散事象シミュレーションプログラムを開発した。
- (2) 浮体式洋上風力発電所の維持管理について、国内外の実証研究や調査研究等の文献調査、および故障データベースの分析により、風車・BOP の維持管理データベースを構築した。
- (3) 構築した離散事象シミュレーションおよび維持管理データベースを用いて、浮体式洋上風力発電の維持管理に関する最新技術によって、維持管理コストが 22% 低減することを示した。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構グリーンイノベーション基金事業「洋上風力発電の低コスト化／洋上風力運転保守高度化事業」にて得られた成果の一部である。維持管理コスト技術に関してご教示を頂いた東京電力リニューアブルパワー株式会社、東芝エネルギーシステムズ株式会社に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) C. Maenza et al., A life cycle cost model for floating offshore wind farms, *Applied Energy*, 2020.
- 2) 菊地由佳, 石原孟他, 時間領域モンテカルロシミュレーションを利用した洋上風力発電所利用可能率の評価, 第 38 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2017.
- 3) 菊地由佳, 斎藤亮太, 石原孟, 信頼性分析に基づく風力発電コストの評価, 日本風力エネルギー学会論文集, 43(1), 1-12, 2019.
- 4) 東京電力リニューアブルパワー株式会社, 遠隔化・自動化とデジタル技術による予防保全, 事業戦略ビジョン, 2023. <https://green-innovation.nedo.go.jp/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-4/vision-tepco-rp-003.pdf>
- 5) 東芝エネルギーシステムズ株式会社, 遠隔化・自動化とデジタル技術による予防保全, 事業戦略ビジョン, 2023. <https://green-innovation.nedo.go.jp/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-4/vision-global-toshiba-003.pdf>
- 6) Y. Kikuchi and T. Ishihara, Assessment of capital expenditure for fixed-bottom offshore wind farms using probabilistic engineering cost model, *Applied Energy*, 341, 120912, 2023.
- 7) J. Carroll et al., Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines, *Wind Energy*, 2016.
- 8) U. Bhardwaj et al., Review of FPSO accident and incident data, C. G. Soares and Y. Garbatov, Progress in the analysis and design of marine structures, CRC Press, 2017.
- 9) Offshore Technology Conference (OTC) proceedings: OTC-25841-MS Permanent Mooring Reliability & Mooring Risk Management Plan (MRMP), 2015.
- 10) 経済産業省, 令和 3 年度電気保安統計, 2022.
- 11) CIGRE, TB815 WG B1.57 Update of service experience of HV underground and submarine cable systems, 2020.
- 12) 4C offshore, Global Offshore Wind Farms Intelligence, <https://www.4coffshore.com>
- 13) 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.
- 14) Corewind, D4.2 Floating Wind O&M Strategies Assessment, 2021, <https://corewind.eu/publications/>
- 15) J. Walgem, Impact of Wind Farm Control Technologies on Wind Turbine Reliability, Hamburg: Uppsala Universitet, 2019.
- 16) 菊地由佳, 石原孟, 製造と施工方法を考慮したスパー型浮体式洋上風力発電所の建設費評価, 日本風力エネルギー学会論文集, 47(4), 83-94, 2024.
- 17) Offshore Renewable Energy Catapult, The Crown Estate and C/E Scotland, Guide to a Floating Offshore Wind Farm, 2023.
- 18) 資源エネルギー庁, 入札 (着床式洋上風力第 2 回・パイオマス第 6 回) の上限価格設定に当たっての参考資料, https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/086_01_00.pdf