

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*

Assessment of availability of an offshore wind farm by using time-domain Monte Carlo simulation

菊地由佳** 石原孟** ピーター・イーセン*** ノヴィタ・サラスワティ***
Yuka KIKUCHI Takeshi ISHIHARA Peter EECEN Novita SARASWATI

1. はじめに

我が国では、洋上風力発電の導入が期待されており、2013年に、日本で初めての沖合の着床式洋上風力発電所が千葉県銚子沖および福岡県北九州沖に実証研究として運開した。現在、実証研究から商用ウィンドファームへ展開するために、発電コストの低減が求められている。その中で、洋上風力発電所の利用可能率の向上および維持管理費の低減は、発電コストの低減に大きく寄与するといわれる。現在、銚子沖洋上風力発電所における2016年度までの平均利用可能率は86%と欧州に比べ低く、利用可能率の向上が求められている。

一方、オランダのエネルギー研究センターECN (Energy Research Centre of the Netherlands) では、2000年代から、時間領域モンテカルロ法を用いて、洋上風力発電所の利用可能率と維持管理費を評価する手法を開発してきた¹⁾。この手法に基づくシミュレーションソフトウェア ECN O&M Calculator も開発され、維持管理費の低減に関する様々な手法の分析と評価を行っている²⁾。

そこで、本研究では、銚子沖洋上風力発電所を対象に、ECN O&M Calculator を用いて、時間領域モンテカルロシミュレーションを実施することにより、利用可能率の評価とその向上方法の提案を行う。まず、気象・海象シミュレーションを行い、銚子沖洋上風力発電所における風速・波高・波周期の時系列データを求める。次に、銚子沖洋上風力発電所の維持管理モデルを構築し、銚子沖洋上風力発電所の利用可能率を評価する。最後に、維持管理用の作業船の作業限界条件と利用可能率との関係を分析し、作業船による利用可能率向上と維持管理費低減の可能性を評価する。

2. 維持管理シミュレーション

2.1 利用可能率と維持管理費評価モデルの概要

Fig. 1 には維持管理シミュレーションの流れを示す。入力条件として、発電所地点の気象・海象データ、作業船データ、風車の信頼性データ（各部品の故障率・故障モード）を用いる。保全手法は事後保全（Brake down Maintenance）、状態基準保全（Condition Based maintenance）、定期点検（Time based maintenance）に分類される。シミュレーションの結果は、利用可能率と維持管理費として出力される。

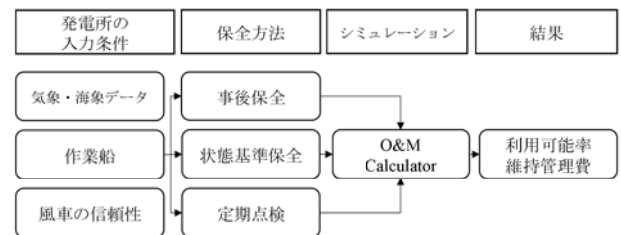


Fig.1 維持管理シミュレーションの流れ

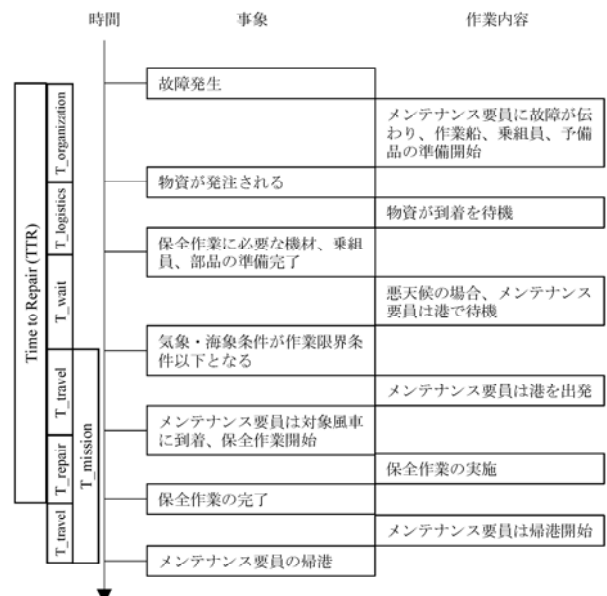


Fig.2 保全作業における時系列事象と作業内容

Fig.2 に示すように、保全作業は、故障が発生すると、気象・海象条件に応じて、作業船が発電所にアクセスし、定められた復旧作業を行うという復旧作業の流れ

* 平成 29 年 12 月 6 日第 38 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社会基盤学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

*** 非会員 Energy Research Center of the Netherlands, Wind Energy Division

で記述できる。ECN O&M Calculator では、風車の故障を各部品の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し、発電所の利用可能率および維持管理費を評価する。ここで、維持管理費は故障に直接かかった費用と発電ロスの合計となる。

2.2 利用可能率評価モデルの詳細

(1) 入力データ

利用可能率評価モデルの入力データを Table 1 に示す。気象・海象データとして、風速・波高の時系列データを用いる。時系列データは、発電量の評価および基地港と発電所間の作業船のアクセシビリティの評価に用いる。経年変化による不確かさを評価するために、最低3年間分の時系列データが必要である。

作業船データとして、維持管理に用いる作業船の作業限界条件、許容乗組員数、基地港と発電所間の航行時間を用い、基地港と発電所間の作業船のアクセシビリティを評価する。

風車の信頼性データとして、各部品の故障率と故障モードを用いる。風車の信頼性を表す指標は信頼度と呼ばれ、次の確率関数で表す³⁾。

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} \quad (1)$$

ここで、 N_0 は全事象の数で、 $N_s(t)$ は時刻 t に正常に動作している数、 $N_f(t)$ は時刻 t に故障している数である。故障率 λ は次式で定義される。

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s(t)} \left(\frac{N_f(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

故障率の逆数は平均故障時間間隔 MTTF として定義される。

$$MTTF = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

本シミュレーションでは、故障率が時間によらず一定であることを仮定する。これは、標準的な故障曲線であるバスタブ曲線の安定期にあたる故障に該当し、故障は偶発的に生じる。

発電所データとして、風車基数とパワーカーブを用い、パワーカーブは発電量評価のために用いる。

Table 1 利用可能率評価モデルの入力データ

大項目	小項目
気象・海象	風速・波高の時系列
作業船	作業限界条件 許容乗組員数
風車の信頼性	故障率 故障モード
発電所情報	基数 パワーカーブ

(2) 維持管理モデル

以下に、3つの保全手法の詳細を記述する。事後保全は故障後に実施される。各部品に対して定めた故障モード毎に、必要な保全方法を定める。保全方法においては必要となる作業員数、作業船、交換部品、補修時間を定める。Fig.3 にはブレードの例を示す。

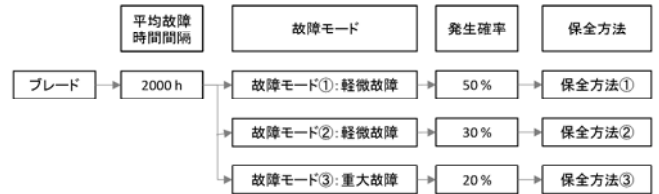


Fig.3 ブレードの故障モード、発生確率、保全方法

状態基準保全は、状態監視システムを用いて、部品の状態を観測し、何らかの劣化の傾向がみられた時に実施する保全である。我が国ではまだ本格的に導入されていないため、本研究では考慮していない。定期点検は故障の有無に関わらず、定められた時間を実施するため、風車1基あたりに必要な作業時間、作業人員、作業船を予め定める。

(3) モンテカルロシミュレーション

故障の発生はポアソン過程を仮定し、各部品の故障率 λ に従って、発生させてシミュレーションを実施する。故障が発生すると、Fig.2 に示す事象を順に事後保全を実施する。事後保全とは別に、定期点検を定められた時間を実施する。

2.3 維持管理費の評価

維持管理費は、保全に直接発生する費用とダウンタイムにより発生した発電ロスの合計で評価される。保全費は、前節で示した時間領域シミュレーションにおいて、事象ごとに発生するコストを計上していくことにより評価する。発電ロスは、風車を停止していた期間の気象条件から損失した発電量を評価し、売電価格を乗じることで評価する。主に発生するコストを Table 2 に示す。

Table 2 主に発生するコストの一覧

大項目	小項目
発電ロス	電気価格
労務費	1人あたり日賃 1人あたり年収
作業船費	1時間/日あたりの作業中単価 1時間/日あたりの待機中単価 燃料費 機装費、解総費 年間固定費
交換部品費	交換部品費 交換部品の保管費

3. 銚子沖洋上風力発電所の利用可能率の評価

3.1 発電所の概要

Fig.4 には、千葉県銚子沖洋上風力発電所の位置（緑点）、商用ウィンドファームに拡大した際に想定されるレイアウト（白点）を示す。銚子沖洋上風力発電所では、赤枠で囲んだ名洗港を維持管理の基地港としている。名洗港から発電所までの距離は 3.4km である。商用ウィンドファームは 5.2MW 風車 14 基を仮定する。



Fig.4 銚子沖洋上風力発電所

3.2 気象・海象シミュレーションの計算条件

風速および波高の時系列データを得るために、メソスケールモデル WRF Ver3.4.1 (Weather Research and Forecasting) および WW3 Ver3.14 (Wave Watch III)を用いて、2011 年 1 月から 2016 年 12 月までの 6 年間の風速および波高の時系列データを求めた。計算条件を Table 3 および Table 4 に示す。気象・海象シミュレーションに関する詳細は参考文献 4)を参照されたい。

Table 3 気象シミュレーションの計算条件

水平解像度	18km, 6km, 2km
水平格子数	100×100
鉛直層数	45 層
タイムステップ	72 秒, 24 秒, 8 秒
気象データ	NCEP-FNL 1°×1° 6-hourly
海面水温データ	OSTIA 0.05°×0.05° 6-hourly
地形データ	標高：国土地理院 50m メッシュ 土地利用：国土数値情報 100m メッシュ

Table 4 海象シミュレーションの計算条件

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
水平解像度	0.5°	0.2°	0.05°	0.01°
格子数	320×240	80×80		
海底地形	ETOPO1			
海面境界条件	NCEP-FNL	WRF (18km)	WRF (6km)	WRF (2km)
側面境界条件	開境界	ネストダウン (2-way)		
解像度	周波数：36(0.0345～0.97Hz), 方向 36			

保全作業と作業船の関係を Table 5 に示し、各保全作業に用いる作業船を設定している。日本で最もよく用いられている交通船の諸元について Table 6 に示し、作業限界条件およびコストを定めた。

Table 5 保全作業と作業船の関係

保全作業	作業船
通常メンテナンス作業	アクセス船
基礎保全作業	自己昇降台船
ケーブル保全作業	ケーブル布設船
ダイバー作業	ダイバーサポート船
輸送作業	風車クレーン船

Table 6 交通船の諸元

	限界波高	1m
	技術者数	6
	作業費	560 €
	待機費	498 €
	燃料費	100 €

故障率と故障モードについて、本研究では、欧州の ReliaWind プロジェクト⁵⁾による調査結果を参照した。保全方法は、事後保全と定期点検の 2 種類とし、状態基準保全を用いない。定期点検は欧州にならい 1 基あたり 24 時間かかるとした。

3.3 利用可能率の評価

ダウンタイムの内訳、風車基数と利用可能率および維持管理費の関係および風車基数と保全費、発電ロス、年間発電量の関係は Fig.5, Fig.6, Fig.7 に示す。

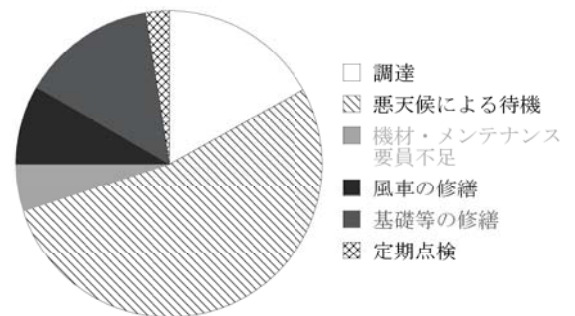
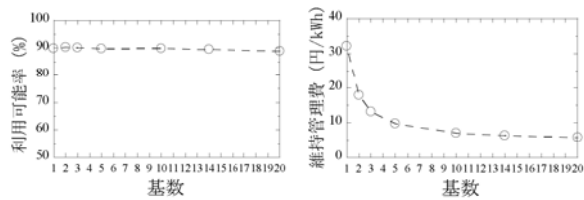


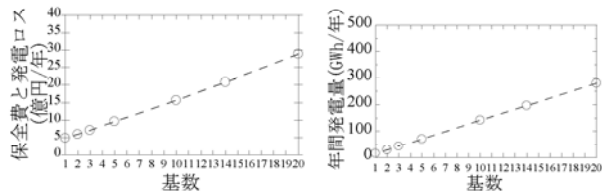
Fig.5 ダウンタイムの内訳

利用可能率は、大凡 90%と風車基数に対してほぼ変わらない (Fig.6)。ダウンタイムの内訳 (Fig.5) をみると、悪天候による待機時間の割合が 5 割を占めており、気象・海象条件によりアクセスできないことが大きいことが分かる。1kWh あたりの維持管理費は、1 基から 14 基になることで約 1/10 に減少する (Fig.6)。これは、保全費は固定費と変動費からなるのに対し、年間発電量は基数に比例するため、基数が増加すると、固定費が減少するためである。保全費・発電ロス、年間発電量は風車基数に比例し、増大している (Fig.7)。



(a) 利用可能率 (b) 維持管理費

Fig.6 風車基数と利用可能率・維持管理費の関係



(a) 保全費と発電ロス (b) 年間発電量

Fig.7 風車基数と保全費・発電ロス、発電量の関係

3.4 利用可能率向上のための対策

ダウンタイムの分析では悪天候による待機時間が大きかったため、アクセス船の性能向上による利用可能率向上の有効性について評価した。Table 7 と Table 8 にはそれぞれ洋上風力発電所用のアクセス船および大型アクセス船の諸条件を設定した。

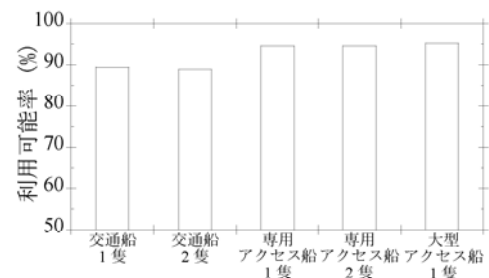
Table 7 アクセス船の諸元

	限界波高	1.5m
	技術者数	12
	作業費	1120 €
	待機費	996 €
	燃料費	200 €

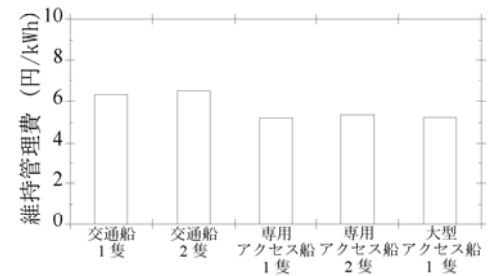
Table 8 大型アクセス船の諸元

	限界波高	2.0m
	技術者数	24
	作業費	2240 €
	待機費	1992 €
	燃料費	400 €

Fig.8 に示すように、利用可能率は、交通船 2 隻で 89%とほとんど変わらないのに対し、洋上風力発電所専用アクセス船を利用した場合には 94%と向上した。維持管理費は、交通船 2 隻でほとんど変わらないのに対し、専用アクセス船を用いる場合には待機時間がなくなることで発電ロスが減り、大幅に減少した。専用アクセス船 2 隻になると利用可能率が若干上昇するものの、発電コストも上昇する。また大型アクセス船の導入に関しても、同様に維持管理費が若干上昇している。以上より、洋上風力発電所専用アクセス船 1 隻を導入することが最適である。



(a) 利用可能率



(b) 維持管理費

Fig. 8 作業船と維持管理費との関係

4. まとめ

本研究では、銚子沖洋上風力発電所を対象に、6 年間分の気象・海象シミュレーションを用いて、維持管理における時間領域モンテカルロシミュレーションを実施し、以下の結論を得た。

- 1) 洋上風力発電所の維持管理モデルを構築し、利用可能率・維持管理費と風車基数の関係を明らかにした。
- 2) 構築した維持管理モデルを用いて、アクセス船の性能向上により、利用可能率の向上と維持管理費の低減を同時に達成できることを示した。

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（NEDO）の委託業務で得られた研究成果である。関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) L.W.M.M Rademakers, H. Braam, T.S.Obdam, Estimating costs of operation & maintenance for offshore wind farms, EWEC, 2008.
- 2) M. Asgarpour and R. Van de Pietermen, O&M Cost reduction of offshore wind farms: A Novel Case Study, ECN report, 2014, <https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E-14-028>
- 3) Peter Tavner, Offshore Wind Turbines: Reliability, availability and maintenance, 2012.
- 4) 菊地由佳, 石原孟, 気象・海象シミュレーションを用いた洋上風力発電所の施工稼働率の予測, 2015.
- 5) PF. Spinato. "The reliability of Wind Turbines", PhD Thesis, Durham University, 2008.