

第I部門

耐風・風工学(1)

[I-225] 風車の故障モード影響解析に基づく発電コストの評価に関する研究  
Assessment of levelized cost of wind energy based on failure mode and effects analysis

○小久保 秀海<sup>1</sup>、菊地 由佳<sup>1</sup>、石原 孟<sup>1</sup> (1.東京大学)

○Hidemi Kokubo<sup>1</sup>, Yuka Kikuchi<sup>1</sup>, Takeshi Ishihara<sup>1</sup> (1.The University of Tokyo)

キーワード：風力発電コスト, 故障モード影響解析, 時間領域モンテカルロ法

cost of wind energy, Failure Mode and Effects Analysis, time-domain Monte-Carlo method

本研究の目的は、故障モード影響解析に基づいて、日本の風力発電コストの低減シナリオを提案することである。故障データベースを用い、故障モード影響解析を実施した。次に、日本と欧米を比較し、故障モードの発生割合は同じだが、故障復旧ダウンタイムは日本が欧米を大幅に上回ることを示した。最後に、故障モード影響解析の結果と時間領域モンテカルロ法を用い、予備品保有、状態基準保全実施、修繕の習熟度向上のシナリオを分析し、利用可能率は87%から97%まで向上し、発電コストは13.8円/kWhから10.7円/kWhまで低減することを示した。習熟度向上による資本費の低減により、世界平均の8.8円/kWhまで低減する。

## 風車の故障モード影響解析に基づく発電コストの評価に関する研究

東京大学 学生会員 ○小久保 秀海  
 東京大学 正会員 菊地 由佳  
 東京大学 正会員 石原 孟

## 1. はじめに

風力発電競争力強化研究会報告書<sup>1)</sup>によると、風力による発電コストは、世界平均が8.8円/kWhである一方、日本は13.9円/kWhと高い。原因の1つに、世界平均97%に対し日本の87%という低い利用可能率が考えられる。欧州では、風車の故障モード影響解析を実施し、利用可能率向上・発電コスト低減のシナリオを評価しているが、日本で運用されている風車の故障モード影響解析が実施された例はなく、欧米との違いも明らかではない。風力発電コスト低減シナリオについて、菊地ら<sup>2)</sup>のシナリオでは、大型部品・小型部品の二種類にしか分類しておらず、現実的でない。

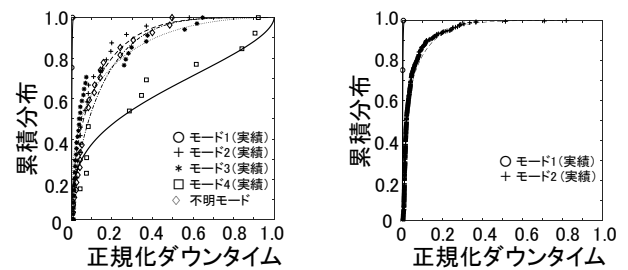
本研究では、日本の故障事故データベースを用いて故障モード影響解析を実施する。次に、日本と欧米の故障モード影響解析の結果を比較し、日本の特徴を明らかにする。最後に、故障モード影響解析の結果と時間領域モンテカルロ法を用いて、利用可能率向上のシナリオを提案する。

## 2. 故障モード影響解析と日本と欧米との比較

本研究では、2012-2016年度に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)が収集した故障事故データ(以下、NEDOデータ)<sup>3)</sup>を用いて、故障モード影響解析を行った。新エネ法が施行された1997年以降に設置された売電事業用風車を対象とし、ダウンタイムが1年以上のものは対象外とした。NEDOデータにはダウンタイムが3日以内の故障が収集されていないことから、経済産業省北海道産業保安監督部が収集したデータの分布を用いて3日以内のダウンタイムの故障を補完した<sup>3)</sup>。複数部位故障は、単部位故障の平均値による重み付けを行い、単部位故障に分解した。以上より、全体の故障数は4569件となった。

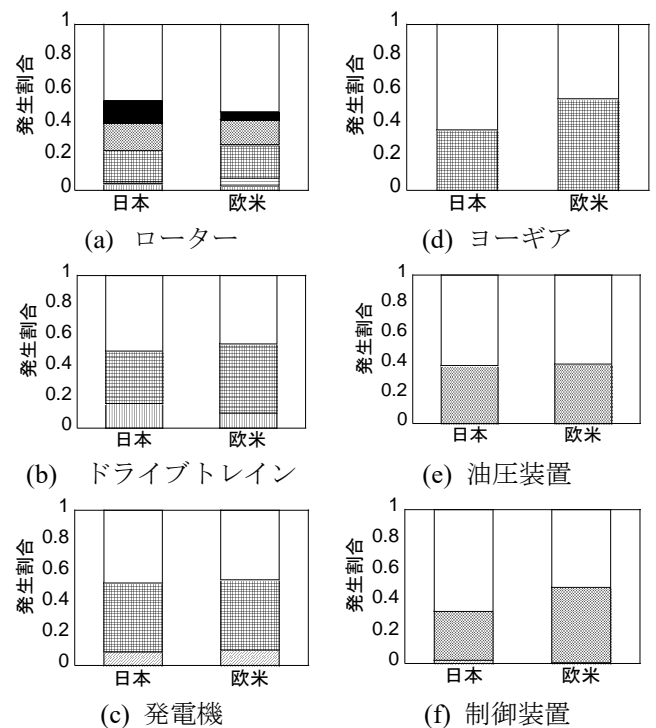
NEDOデータの「被害状況」「復旧処置対策」「故障・事故発生原因(速報時推測)」には、サブアセンブリの故障状況や復旧方法が記載されている。サブアセンブリ単位での故障部品と復旧に用いる機材・手法を基に故障モードに分解した。また、補完したダウンタイム3日以内の故障については、微小な故障モードとして他と区別した。ローター・駆動系部品のうちブレード、ギ

アボックス、主軸/ベアリングは3種類の故障モードに、ハブと発電機は2種類の故障モードに分解された。電気・制御系の小型部品のうち、ヨー装置、ピッチ制御装置、油圧装置は同一の分布を示したため一つの故障モードに、電気・制御装置は2種類の故障モードに分解された。図1には、ブレードと電気・制御装置の各モードの故障復旧ダウンタイムの累積分布を示す。部品に関わらず、最もダウンタイムの小さい故障モードの分布はよく類似していることが分かる。



(a) ブレード (b) 電気・制御装置

図1 各モードの故障復旧ダウンタイムの累積分布



(c) 発電機 (f) 制御装置

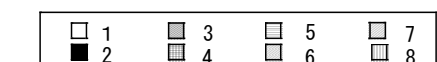


図2 部品ごとの故障モード発生割合

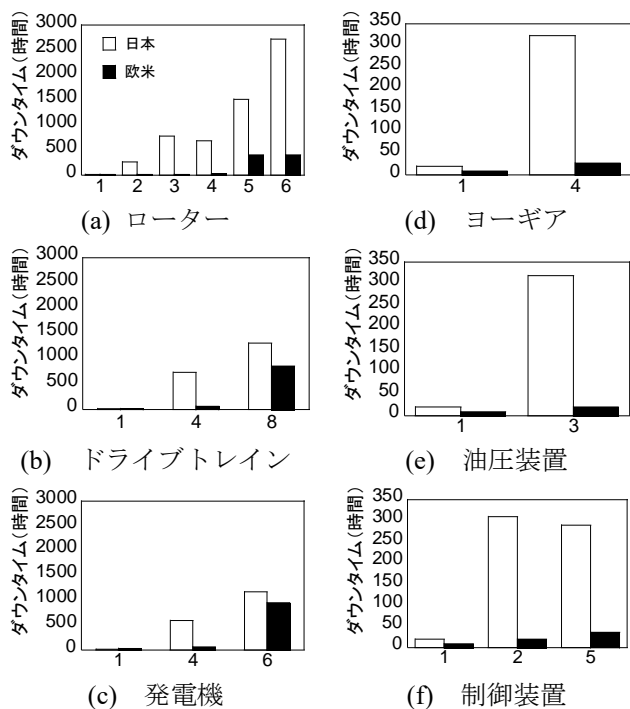


図3 故障モードごとの故障復旧ダウンタイム

分析した日本の故障モード影響解析の結果と欧米の結果を比較した。図2は、部品ごとの故障モードの発生割合を表している。日本と欧米で故障モードの発生割合は類似していることがわかった。図3は、故障モードごとのダウンタイムの比較である。日本の故障復旧ダウンタイムは、欧米に比べて3倍から10倍程度ダウンタイムが長いことがわかった。また、電気事業者へのヒアリングをもとに、人員や部品を調達するための「調達時間」と実際に修理するための「修繕時間」の二つにダウンタイムを分解した。この結果、調達時間・修繕時間の双方において、日本は欧米より長くかかっていることが明らかになった。

#### 4. 時間領域モンテカルロ法による発電コスト評価

分析した故障モード影響解析の結果と時間領域モンテカルロ法を用いて、発電コスト低減のシナリオを提案する。時間領域モンテカルロ法とは、故障を故障モード毎にポアソン過程に基づく乱数で発生させ、故障発生後、入力した調達時間および修繕時間に基づいて維持管理を実行し、積算によって年間ダウンタイムを評価する手法である<sup>4)</sup>。故障モード影響解析で得た各モードの故障率と故障復旧ダウンタイムを入力し、利用可能率87.4%となる故障率の補正係数を同定した。

インタビューと文献調査により、シナリオを立てた。シナリオ1では、電気事業者へのインタビュー結果に基づき、小さい故障モードにおける部品の予備品を国

内に保有した場合、小型部品の全故障、および大型部品の軽微な故障による一件当たりダウンタイムが3日になると仮定した。シナリオ2では、状態基準保全の適用により、故障復旧ダウンタイムが25日から10日に減少したという文献に基づき、ブレード、ギアボックス、主軸/ベアリング、発電機に状態基準保全を適用することにより故障復旧ダウンタイムが10日になるとした。シナリオ3では、修繕時間が、国内の電力発電量が増えるにつれ習熟曲線に従って低減すると仮定した。2016年度の風力導入量3,357,544kWから一般社団法人日本風力発電協会<sup>5)</sup>による2030年の風力導入量目標値3620万kWに対して、風車の利用可能率が97%となるために必要な習熟率は0.209と同定された。

シナリオ1, 2, 3において時間領域モンテカルロシミュレーションを実施し、利用可能率は、87%から、92.2%, 93.4%, 97%へと向上した。発電コストは13.8円/kWhから12.2円/kWh, 11.8円/kWh, 10.7円/kWhと低減した。資本費に習熟率0.184を適用することにより、発電コストは世界平均の8.8円/kWhまで低下する。

#### 5. まとめ

本研究は、日本の風車故障データベースを用いて、故障モード影響解析を実施し、故障モードの発生割合は日本と欧米で変わらないが、故障復旧ダウンタイムは、日本は欧米を大幅に上回ることを示した。故障モード影響解析の結果と時間領域モンテカルロ法を用いて、予備品保有・状態基準保全・習熟度向上のシナリオを提案し、発電コストの低減が可能であることを示した。

#### 参考文献

- 1) 風力発電競争力強化研究会, 風力発電競争力強化研究会報告書, 2016.
- 2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 風力等自然エネルギー技術研究会開発風力発電高度実用化研究開発スマートメンテナンス技術研究開発(分析)(疲労予測等)平成24-286年度風力発電故障・事故調査結果報告書, 2013-2017.
- 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. 風力エネルギー学会論文集, Vol. 43, No. 1. pp1-12, 2019
- 4) 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, 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39回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.379-382, 2017
- 5) 日本風力発電協会, 風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 V4. 3, 2014.