

故障復旧費と故障復旧ダウンタイムの不確かさを考慮した発電コストの評価*

Assessment of Levelized Cost of Electricity considering uncertainty in repair costs and downtimes

斎藤亮太**

Ryota SAITO

菊地由佳***

Yuka KIKUCHI

石原孟***

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

現在、風力発電の大量導入のため、発電コストの低減が求められている。風力発電競争力強化研究会報告書¹⁾によると、我が国の発電コストの平均値は 13.9 円/kWh であり、世界の平均値 8.8 円/kWh の約 1.6 倍となっている。2030 年までに 8~9 円/kWh まで低減することが国の目標となっている。高い発電コストの要因として、発電コストの高い風車が平均値を押し上げている可能性が考えられ、その対策を講じる必要がある。一方、我が国の風力発電コストの不確かさは不明である。特に、風車故障による故障復旧ダウンタイムと故障復旧費は、発電コストの不確かさに大きく影響していると考えられ、その分析は急務である。

風車故障に関するデータベースとしては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が収集するデータ(以下、NEDO データ)²⁾と、経済産業省北海道産業保安監督部が収集するデータ(以下、保安監督部データ)³⁾がある。稲村ら⁴⁾が開発した風車故障リスク評価モデルでは、NEDO データを用い、故障事故発生確率および損害率(故障復旧費/風車価格)を求め、モンテカルロシミュレーションを用いて再現期間別年間損害額を評価している。しかし、NEDO データは、回収の割合が約 4 割であり、また故障復旧ダウンタイム 3 日未満の故障データが回収されていないことや 3 ヶ月以上のデータが不十分であることから、その補正方法を提案する必要がある。一方、保安監督部データは故障復旧ダウンタイム 1 時間以上の故障から収集しており、回収率も約 8 割であるが、故障復旧費のデータは収集されておらず、コストの評価に適用できない。

そこで、本研究では、まず、NEDO データと保安監督部データを比較することにより、NEDO データの妥当性を検証するとともに、故障復旧ダウンタイムの補正方法を提案し、その確率モデルを構築する。補正したデータを用いて故障復旧ダウンタイムのモデルを構築する。次に、故障復旧費の補正方法を提案するとともに、故障復旧ダウンタイムとの相関を考慮した

故障復旧費の確率モデルを構築する。最後に、不確かさを考慮した風力発電コストモデルを構築し、各コスト要素の不確かさの影響を明らかにする。

2. 故障復旧ダウンタイムの評価

2.1 NEDO 故障・事故データベースの検証と補正

NEDO データと保安監督部データの収集項目を表 1 に示す。各データベースの詳細については参考文献 2), 3), 5)を参照されたい。2012~2014 年度のデータから、故障率と故障復旧ダウンタイムを評価した結果を表 2 に示す。NEDO データは 3 日未満の故障を収集していないため、故障率は低く、故障復旧ダウンタイムの平均値は高い。また、NEDO データは 3 ヶ月以上の故障件数が保安監督部データと比較して 1.64 倍低く、回収率が低いことによるものと思われる。

表 1 NEDO データと保安監督部データの比較
(2012~2014 年度)

	NEDO	保安監督部
調査対象地域	全国	北海道
故障復旧 ダウンタイム	3 日以上	1 時間以上
故障復旧費	あり	なし
故障件数	1135 件	943 件
調査協力基数	2337 基	661 基
回収率	約 4 割	約 8 割

表 2 各データの故障率と故障復旧ダウンタイム

	NEDO (全国)	NEDO (北海道)	保安監督部 (北海道)
故障率 (件/基/年)	0.49	0.62	1.43
故障復旧ダウンタイム の平均値 (時間/件)	1109	1102	590

NEDO データの妥当性を検証するために、2012~2014 年度の 3 日以上 3 ヶ月未満の故障について、NEDO データと保安監督部データにおける故障復旧ダウンタイムの頻度分布を評価し、図 1 に示した。故障復旧ダウンタイムの頻度分布はよく一致し、NEDO データの妥当性が示された。

* 平成 29 年 12 月 7 日第 39 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

*** 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

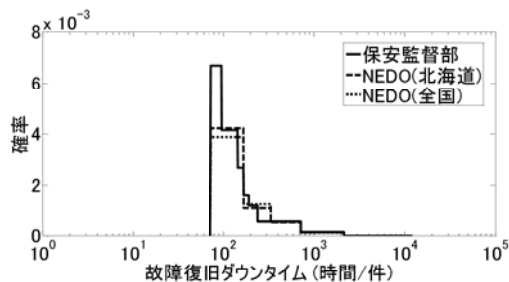


図1 3日~3ヶ月の故障復旧ダウンタイムの頻度分布

図1に示す通り、NEDOデータと保安監督部データの頻度分布が一致したことから、保安監督部データの1日未満の故障、1日以上3日未満の故障、3日以上3ヶ月未満の故障、3ヶ月以上の故障数の比率 1.18 : 0.553 : 1 : 0.164 を用いて、NEDOデータを補正した。3ヶ月以上の故障につき、保安監督部データの故障率と同じなるよう故障数を補正した。北海道における故障数の比率を全国に適用したのはNEDOデータの全国と北海道の故障復旧ダウンタイムの頻度分布がよく一致することからである。表3に示すように、補正後のNEDOデータの故障率、故障復旧ダウンタイムの平均値は保安監督部データと近い値となった。

表3 補正後の故障率と故障復旧ダウンタイム

	NEDO (全国)	NEDO (北海道)	保安監督部
故障率 (件/基/年)	1.26	1.61	1.43
故障復旧ダウンタイム の平均値 (時間/件)	591	586	590

1件あたりの故障復旧ダウンタイムから、1基あたりの故障復旧ダウンタイムを評価するため、保安監督部データを用いて、ダウンタイム別の1件当たりと1基当たりの故障率の比を求め、この比を乗じることで、1基あたりの故障復旧ダウンタイムの頻度分布を評価し、図2の黒線に示した。平均値は876時間/基、変動係数は1.60である。風車1基の平均定格出力が1457kWであるため、故障復旧ダウンタイムの876時間/基を0.60時間/kWに変換される。

2.2 故障復旧ダウンタイムの確率モデル

補正したNEDOデータを用いて、故障復旧ダウンタイムの確率モデルのパラメータを、モーメント法を用いて求めた。用いた確率モデルはベータ分布、対数正規分布、ワイブル分布であり、適用した結果を図2に示す。各モデルに対して、モデルの予測値と観測値との差を平均自乗誤差 (RMSE) により評価し、それぞれ 5.46×10^{-4} 、 4.41×10^{-4} 、 1.99×10^{-4} となり、ワイブル分布のRMSEが最も小さい。本研究では故障復旧ダウンタイムの確率分布はワイブル分布を採用した。

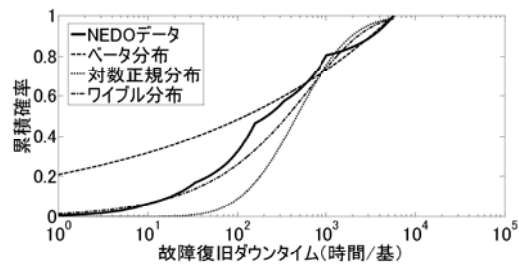


図2 故障復旧ダウンタイム (時間/基)の累積分布

3. 故障復旧費の評価

3.1 故障復旧費のNEDOデータの補正と検証

故障復旧ダウンタイムと故障復旧費との関係を定量的に評価するため、ダウンタイム別に故障復旧費の平均値と標準偏差を求め、白丸で図3に示す。故障復旧ダウンタイムの増加に従い、平均値・標準偏差は線形的に増加する。これは、ダウンタイムの長い故障ほど、大型部品の故障である可能性が高く、故障復旧費の平均値・標準偏差も高くなっていると思われる。故障復旧ダウンタイムが3日未満の故障復旧費は、3日以上1週間未満の故障復旧費から推定した値と同じであると仮定し、一定とした。故障復旧費の平均値と標準偏差を式(1)と式(2)により表す。式(2)と式(3)に従う平均値と標準偏差をもつ対数正規分布を仮定し、3日未満と3ヶ月以上の故障の故障復旧費を補正した。

図4には補正前と補正後の故障復旧費と故障復旧ダウンタイムとの関係を示す。灰色丸は補正前のデータ、白丸は式(2)と式(3)により生成した補正後のデータを表す。3日以上では、故障復旧ダウンタイムの増加につれ、故障復旧費が増加する傾向が見られる。

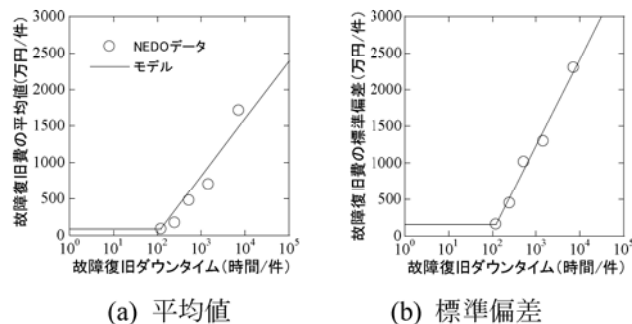


図3 故障復旧費と故障復旧ダウンタイムとの関係

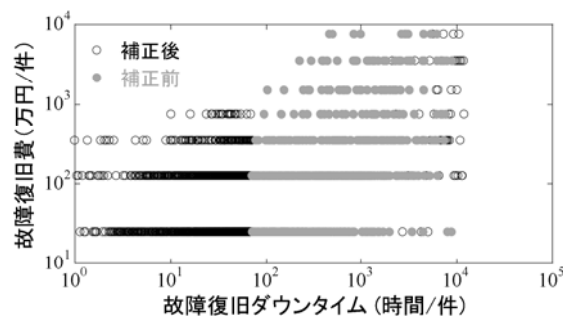


図4 補正前と後の故障復旧費とダウンタイムの関係

表 4 故障復旧ダウンタイム別の故障復旧費

		故障復旧ダウンタイム（時間/件）					
		3 日未満	3 日~1 週間	1~2 週間	2 週間~1 ヶ月	1~3 ヶ月	3 ヶ月以上
故障復旧費 (万円/件)	観測値	90	90	170	474	701	1708
	コピュラ (誤差)	163 (+81%)	179 (+99%)	221 (+30%)	269 (+43%)	393 (+44%)	893 (+48%)
	本提案 (誤差)	90 (0%)	112 (+24%)	315 (+85%)	566 (+19%)	872 (+24%)	1279 (-25%)

$$\mu = \begin{cases} 90 & T_{\text{repair}} < 120 \\ 342 \ln T_{\text{repair}} - 1545 & T_{\text{repair}} \geq 120 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma = \begin{cases} 159 & T_{\text{repair}} < 120 \\ 509 \ln T_{\text{repair}} - 2278 & T_{\text{repair}} \geq 120 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 故障復旧費の確率モデル

故障復旧ダウンタイム別の故障復旧費の確率モデルのパラメータをモーメント法により求め、それぞれのモデルの RMSE を評価した。ベータ分布、対数正規分布、ワイブル分布の中で、対数正規分布の誤差が最も小さいため、故障復旧ダウンタイム別の故障復旧費は、式(1)と式(2)に示す平均値と標準偏差をもつ対数正規分布により表す。

1 件あたりの故障復旧費（円/件）から、1 基あたりの故障復旧費（円/基）を変換するため、1 件当たりと 1 基当たりの故障率の比 $\lambda (=1.26)$ を乗じることにより行った。保安監督部データに復旧費のデータがないため、式(3)に示す簡易な方法を用いた。

$$C_{\text{repair}}(\text{円/基}) = C_{\text{repair}}(\text{円/件}) \times \lambda (\text{件/基}) \quad (3)$$

図 5 には 1 基あたりの故障復旧費の累積分布を示し、黒線は観測値である。補正した NEDO データを用いて、故障復旧ダウンタイムの確率モデルのパラメータをモーメント法を用いて求めた。代表的な確率モデルであるベータ分布、対数正規分布、ワイブル分布を適用した結果も図 5 に示す。各モデルに対して、モデルと観測値との平均二乗誤差 RMSE を評価した所、順に $5.04\text{e-}04$ 、 $1.87\text{e-}04$ 、 $5.58\text{e-}04$ となり、対正規分布の RMSE が最も小さい。補正後の故障復旧費データの平均値は 334 万円/基、変動係数は 3.11 である。

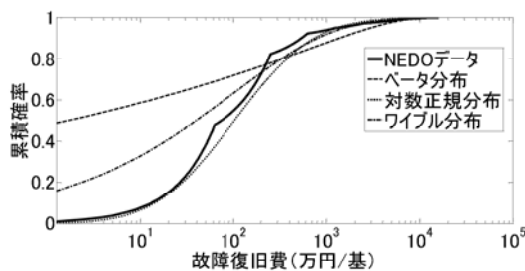


図 5 故障復旧費（万円/基）の累積分布

風車 1 基の平均定格出力が 1457kW であるため、故障復旧費の平均値の 334 万円/基を 2292 円/kW に変換される。本研究では全国の故障復旧費 2300 円/kW と仮定した。

3.3 故障復旧費と故障復旧ダウンタイムとの相関

本研究で提案した故障復旧ダウンタイム別の故障復旧費の確率モデルと正規コピュラ関数を用いて、故障復旧ダウンタイムと故障復旧費の関係を求め、補正した NEDO データから求めた値と共に表 4 に示す。コピュラでは、短いダウンタイムでは過大評価し、長いダウンタイムでは過小評価する結果となった。一方、本研究で提案したダウンタイム別の平均値と標準偏差をもった対数正規分布を用いる場合、故障復旧費と故障復旧ダウンタイムとの相関関係をより正確に考慮したため、表 4 に示すように、本提案手法により故障復旧費の過小評価・過大評価が解消されている。

4. 発電コストの評価

本章では不確かさを考慮した発電コストモデルを構築する。発電コスト LCOE は式(4)により評価される。

$$LCOE = \frac{CAPEX \times FCR + OPEX}{AEP} \quad (4)$$

ここで、CAPEX は資本費、FCR は年経費率、OPEX は年間維持管理費、AEP は年間発電量である。また年間維持管理費は故障復旧費 C_{repair} 、定期点検費 C_{periodic} 、その他の費用 C_{others} に分けて、式(5)により表すことができる。年間発電量はパワーカーブ $P(f)$ と風速の頻度分布 $U(f)$ に利用可能率 $Availability$ を乗じることにより、式(6)から評価することができる。さらに利用可能率は、1 年間の内に、風車が正常に稼働できる時間の割合で定義され、式(7)により評価される。ダウンタイムは故障復旧によるダウンタイム T_{repair} と定期点検によるダウンタイム T_{periodic} の和になる。

$$OPEX = C_{\text{repair}} + C_{\text{periodic}} + C_{\text{others}} \quad (5)$$

$$AEP = \sum P(f) \times U(f) \times Availability \quad (6)$$

$$Availability = \frac{8760 - (T_{\text{repair}} + T_{\text{periodic}})}{8760} \quad (7)$$

資本費について、調達価格算定委員会の報告書⁹⁾に

掲載されている図から数値を抽出し、モーメント法を用いて各モデルのパラメータを求め、図6に示す。ベータ、対数正規、ワイブルのRMSEはそれぞれ $1.01\text{e-}02$ 、 $1.07\text{e-}02$ 、 $9.60\text{e-}03$ であり、ワイブル分布の誤差は最も小さいことが分かる。平均値は31.4万円/kW、変動係数は0.27である。

図7にはモンテカルロシミュレーションにより求めた発電コストの累積分布を示す。発電コストの平均値13.9円/kWhに対して、変動係数は0.58である。ここで、発電コストの平均値と国の公表値と一致させるために、故障復旧ダウンタイム、故障復旧費、資本費については、平均値が国の報告値と一致させ、変換係数、故障復旧ダウンタイムと故障復旧費との相関は本研究から得られた値を用いた。その他のコスト要素は定数と仮定した。各コスト要素については国が公表した値を参考に表5のように設定した。年経費率は年利2%、調達期間20年として評価した。競争力強化研究会報告書¹⁾では維持管理費の総額は9300円/kWと示され、故障復旧費は本研究の結果を用い、その他は総額と故障復旧費との差額から求めた。ダウンタイムの総和は国が公表した利用可能率から算出し、さらに故障復旧ダウンタイムは本研究の結果を用い、定期点検ダウンタイムは総ダウンタイムとの差から求めた。

表5 発電コストの算定に用いたパラメータ

		平均値	変動係数
資本費 ¹⁾		28.2万円/kW	0.27
年経費率 ¹⁾		6.12%	—
維持管理費	故障復旧費	2300円/kW	3.11
	その他 ¹⁾	7000円/kW	—
設備利用率 ¹⁾		21.8%≒22%	—
利用可能率 ¹⁾		87%	—
故障復旧ダウンタイム		876時間/基	1.60
定期点検ダウンタイム ¹⁾		263時間/基	—
発電コスト ¹⁾		13.9円/kWh	0.58

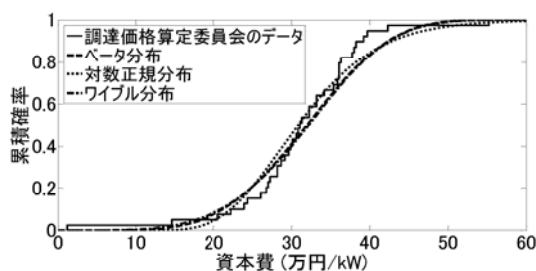


図6 資本費の累積分布

発電コストの不確かさをもたらす要因を明らかにするために、故障復旧ダウンタイム、故障復旧費、資本費の3つの項目について、1項目のみを変数とした場合の発電コストの変動係数を評価した。その結果、各ケースの変動係数は0.33、0.20、0.17となり、故障復旧ダウンタイムの不確かさが発電コストの不確か

さに最も影響を与えていることが分かる。

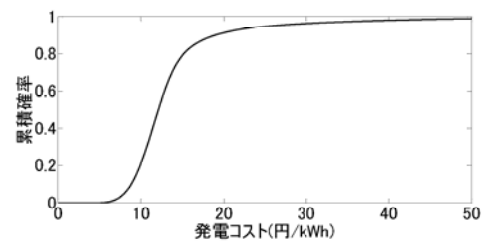


図7 発電コストの累積分布

5. まとめ

本研究では故障復旧費と故障復旧ダウンタイムの不確かさを考慮した発電コスト評価モデルを開発し、以下の結論を得た。

- 1) 3日~3ヶ月における保安監督部データとNEDOデータの故障率、故障復旧ダウンタイムの頻度分布はよく一致し、NEDOデータの妥当性が示された。またNEDOデータに対して3日未満の補正を行い、故障復旧ダウンタイムの確率モデルを構築した。
- 2) 故障復旧ダウンタイム別の故障復旧費の平均値と標準偏差の関係をモデル化することにより、故障復旧費の補正方法を提案するとともに、故障復旧ダウンタイムとの相関を考慮した故障復旧費の確率モデルを構築した。
- 3) 構築した故障復旧ダウンタイム、故障復旧費、資本費の確率モデルを用いて、発電コストの不確かさを評価するとともに、故障復旧ダウンタイムの不確かさが発電コストの変動係数に最も大きな影響を与えていることを明らかにした。

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) 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年，25年，26年度風力発電故障・事故調査結果報告書，2013，2014，2015。
- 3) 経済産業省北海道産業保安監督部，平成24，25，26年度北海道における風力発電の現状と課題，経済産業省 北海道産業保安監督部ウェブサイト，2013，2014，2015。
- 4) 稲村 友彦，足立 慎一，大型風車の設置期間（経年）と保険損害の相関性に関する考察，第38回風力エネルギー利用シンポジウム，2015。
- 5) 菊地由佳，斎藤亮太，石原孟，故障復旧費とダウンタイムの不確かさを考慮した維持管理費の評価，第38回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.263-266，2016。
- 6) 経済産業省，平成29年度以降の調達価格及び調達期間に関する意見，2017。