

# 電力供給リスク低減効果を考慮した分散型電源導入量の最適化

## Optimizing the amount of distributed power sources to be introduced considering the power supply risk reduction effect

都市人間環境学専攻 21N3100026J 佐貫 亮太  
Ryota SANUKI

### 1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの目標に向け導入が進む再生可能エネルギーは二酸化炭素の排出量が少ないといった利点の他に、分散型電源に適しているといった特徴がある。我が国は自然災害による被害が多く、電力系統設備も例外ではない。分散型電源は地域規模で電力を供給するため、大規模電源の事故による電力供給リスクを低減できると考えられる。本研究では、自然災害時の電力リスクを定量化し、リスクを最小化する最適な分散型電源導入量を算出することを目的とする。

しかし自然災害には様々あり、設備や発電方式によってそれぞれの災害に対する脆弱性が異なると考えられる。そこで本研究では、まず災害ごと、電力設備ごとに脆弱性分析を行い、設備によって異なる災害耐性を明らかにした後に、それらを用いて電力リスクを算出する。

### 2. 研究の対象

本研究にて対象とする自然災害は地震、台風、落雷とする。台風による被害は、強風によるものや大雨によるものがあるためそれぞれについて考える。

また、分散型電源として考える再生可能エネルギーは、事業用太陽光発電と陸上風力発電とする。どちらも場所を限らず、分散型電源に適しているため対象とした。

### 3. 研究フロー

まず、自然災害による電力リスクを算出するため、各電力設備の災害時被害確率を求めていく。自然災害ごと、設備ごとに被害率を求める。地震と台風による被害は過去の災害事例をもとに被害率曲線を作成する。落雷については大地雷撃密度や等価受雷面積から被害率を計算する。また、被害があった設備の停止期間も推定する。

次に、推定した各電力設備の災害時被害率のデータを用いて、実系統に仮想の自然災害を発生させることで、系統内の電力リスクを算出する。さらに、リスクの大きい地点に分散型電源を導入した場合のリスクの低減効果を調べる。

また、各分散型電源を導入した際のコストを求め、電力リスク低減効果と併せて最適な導入量を算出する。

### 4. 被害率曲線の作成

過去の被害事例が比較的多かった設備について被害率曲線を作成した。ここでは、災害による運転停止など電力供給に支障があったものを被害ありとする。設備の被

表-1 パラメーター推定結果

地震	$\mu$	$\sigma$	強風	$\mu$	$\sigma$
火力	1.71	0.099	送電	8.38	1.46
水力	2.09	0.26	太陽光	4.32	0.82
送電	2.29	0.19	風力	5.1	0.81
変電	2.26	0.24	大雨	$\mu$	$\sigma$
太陽光	2.22	0.24	水力	4.27	0.92
			変電	4.86	0.43
			太陽光	8.49	2.32

害率は対数正規分布に従うと仮定し、被害率曲線は、最尤法を用いてパラメーターを推定する湯山らの方法を参考に作成した。

災害強さが $x_i$ のときに、設備が被害を生じる確率 $P_1(x_i)$ は、式(1)で表される。

$$P_1(x_i) = \int_0^{x_i} f(x) dx \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

また、設備に被害が生じない確率 $P_0(x_i)$ は、

$$P_0(x_i) = 1 - P_1(x_i) \quad (3)$$

ここから、尤度関数は、式(1)と(3)を用いて、次のように表される。

$$L(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^N P_0(x_i)^{\delta_{i0}} P_1(x_i)^{\delta_{i1}} \quad (4)$$

ただし、被害ありのとき $\delta_{i0} = 0, \delta_{i1} = 1$ であり、被害なしのとき $\delta_{i0} = 1, \delta_{i1} = 0$ である。また、 $N$ はサンプル数を表す。

この尤度関数の対数値が最大となるように式(2)

のパラメーター $\mu$ と $\sigma$ を推定する。

災害強さの指標は地震では計測震度、強風では最大風速、浸水では1時間降水量の最大値とした。

以上のことから、推定した電力系統設備とパラメーターを表-1に示す。

### 5. 落雷による被害

落雷の被害を考える電力設備は、太陽光発電、風力発電である。落雷による年間設備被害回数 $N$ (回)を、式(5)に表す。

$$N = N_g AP \quad (5)$$

ここで、 $N_g$ (回/年 $\cdot$ km $^2$ )は大地雷撃密度、 $A$ (km $^2$ )は設備

の等価受雷面積、 $P$ は設備の落雷被害率を表す。

落雷被害率は日本工業規格で定められる保護レベルに基づいて求める。保護レベルは構造物を落雷から保護する確率を示す保護効率に応じて分類されており、発電所は保護効率 98%の保護レベルIに区分されているため、落雷被害率は2%とする。

## 6. 電力設備の停止期間の検討

電力設備の停止日数を関数として推定する。停止した設備の時点  $t$  における運転開始確率  $F(t)$  は式

(6)で表される。

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (6)$$

$f(x)$ は指数分布、ワイブル分布、対数正規分布のいずれかとする。過去の電力設備の停止期間の実績から、最尤法を用いてこれらの分布へあてはめ、AIC を用いて適合度を比較し、最も適合度の高い確率分布を  $f(x)$  とする。

表-2 に各災害、設備の停止期間について、適合度の高かった確率分布とパラメーターを示す。

## 7. 仮想災害による電力リスク

本節では仮想の地震、台風、落雷と行った自然災害を設定し、それを実系統に発生させた際の電力リスクを算出する。

### (1) 対象地域

本研究では対象地域を東北地方として、東北電力株式会社の電力基幹系統を対象にシミュレーションを行う。東北地方は電力系統が広大で、需要家まで長距離送電する地域が多いため、自然災害による電力リスクが大きいと考えられる。さらに、太陽光、風力共に導入ポテンシャルが高いため対象地域に選定した。

### (2) 仮想の自然災害の設定

シミュレーションに用いる仮想の自然災害について、それぞれ発生確率や各地点の災害強さを求める。地震は地震ハザードステーションの想定地震地図<sup>2)</sup>から、想定地震ごとに発生確率と発生した際の各地の想定震度をまとめた。落雷については落雷日数マップ<sup>3)</sup>より大地雷撃密度を設定した。

台風については、気象庁ベストトラックデータから東北地方に接近した台風を抽出し、これをもとに台風の特性を決定するための式を作成した。仮想台風の特性として、中心気圧深度、最大風速半径、進行速度、進行方向を考え、これらに対数正規分布に従うものとして、最尤法を用いて各分布のパラメーターを推定した。結果を表-3に示す。

台風発生時の各地点の最大風速  $V_m$  (m/s) は以下の式で計算する<sup>4)</sup>。

$$V_m = 0.9G(x)V_{gr} \quad (7)$$

表-2 停止日数の確率分布とパラメーター

災害	設備	確率分布	パラメーター	
地震	火力	対数正規	$\mu=1.83$	$\sigma=1.86$
	水力	指数	$\mu=0.0054$	
強風	風力	指数	$\mu=0.0045$	
大雨	水力	指数	$\mu=0.0019$	
落雷	風力	対数正規	$\mu=3.19$	$\sigma=1.20$

表-3 仮想台風のパラメーター

対数正規分布	$\mu$		$\sigma$			
中心気圧深度(hPa)	2.9		0.51			
最大風速半径(km)	4.79		0.17			
対数正規分布	陸地		太平洋		日本海	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
進行速度(km/h)	3.93	0.41	3.94	0.42	3.92	0.34
進行方向(西を基準)	4.84	0.22	4.84	0.16	4.83	0.2

$$G(x) = G(\infty) + [G(x_p) - G(\infty)] \left(\frac{x}{x_p}\right)^{k-1} \times \exp \left[ \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left\{ 1 - \left(\frac{x}{x_p}\right)^k \right\} \right] \quad (8)$$

$$\frac{V_{gr}}{r} (V_{gr} - C \sin \theta + f) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (9)$$

ここで、 $V_{gr}$  (m/s) は傾度風速、 $G(x)$  は台風の最大風速半径に対する中心からの距離の比である  $x$  における傾度風速と地表風速の比を表す。 $G(\infty)$  は台風周辺での風速比で陸地では 0.5 である。 $x_p$  は  $G(x)$  が最大となる  $x$  で、ここでは 0.5 としている。 $k$  は形状を表すパラメーターで、ここでは 2.5 とした。さらに  $r$  (m) は台風中心からの距離、 $C$  (m/s) は台風の進行速度、 $f$  はコリオリパラメーター、 $\rho$  は空気密度、 $\frac{\partial p}{\partial r}$  は気圧勾配を表す。

仮想台風による雨は気象庁の過去の台風発生時の雨量データから、降雨量を確率分布に従う関数として算出した。東北地方の複数の観測所を選出し、それぞれにおける過去の台風時の 1 時間あたりの降雨量の最大値を調べ、これを Gumbel 分布、一般化極値分布に当てはめを行った。その際 SLSC が小さい分布に降雨量は従うものとした。

シミュレーションにおいて仮想台風時の各地点の降雨量は最も距離の近い観測所を参照するものとする。

台風の発生確率は、ポアソン分布に従うものとして月ごとに算出した。

### (3) 電力リスクの算出

以上のように設定した仮想の自然災害によって系統設備が被害を受けた際の電力供給支障量を電力リスクとして算出する。

シミュレーションでは電力系統を、発電所をノード、送電線をリンクとしたネットワークとして考え、電力系統被害時には最小費用流量問題を解くことで電力の流れを決定する。

まずは東北電力株式会社の2020年度電力潮流実績から、各発電所の正常時発電量と各送電線を通る正常時電力量を設定した。電力潮流は一日中一定とし、月ごとに1時間当たりの潮流の平均値をとり、この値を各送電線に通る電力量とした。また、各変電所に流入する電力量と流出する電力量を比べ、流出量の方が大きい変電所を便宜的に需要ノードとし、電力量の差を需要量とした。

シミュレーションにおいて仮想の自然災害により系統設備が停止した際は、各リンクの容量に送電線の容量を対応させ、コストに正常時電力量に反比例する値を対応させた最小費用流量問題を解く。その結果、需要ノードにおいて正常時の需要電力量を満たせなかった場合、その不足量を電力リスクとして計算する。

#### (4) シミュレーション結果

シミュレーションを行う期間は、分散型電源の運用期間を考慮して2020年からの20年間とし、これを50回繰り返して電力リスクの平均値を算出する。期間中の東北電力株式会社の発電所運転・廃止計画や電力需要の変化も考慮してシミュレーションを行った。結果を図-1に示す。電力リスクが大きい場所は、比較的発電所から送電距離が遠く、基幹送電線の接続が少ない場合が多く見受けられた。

#### 8. 分散型電源導入による電力リスク低減効果

図-1の結果と太陽光・風力の導入ポテンシャルから岩手県宮古市に分散型電源を導入した場合の電力リスク低減効果を算出する。太陽光発電、風力発電の1時間あたりの発電量をそれぞれ式(10)、式(11)に示す。

$$E_{ph} = \frac{0.73PH}{24} \quad (10)$$

$$E_{wh} = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{\pi R^2}{4} \right) V^3 \quad (11)$$

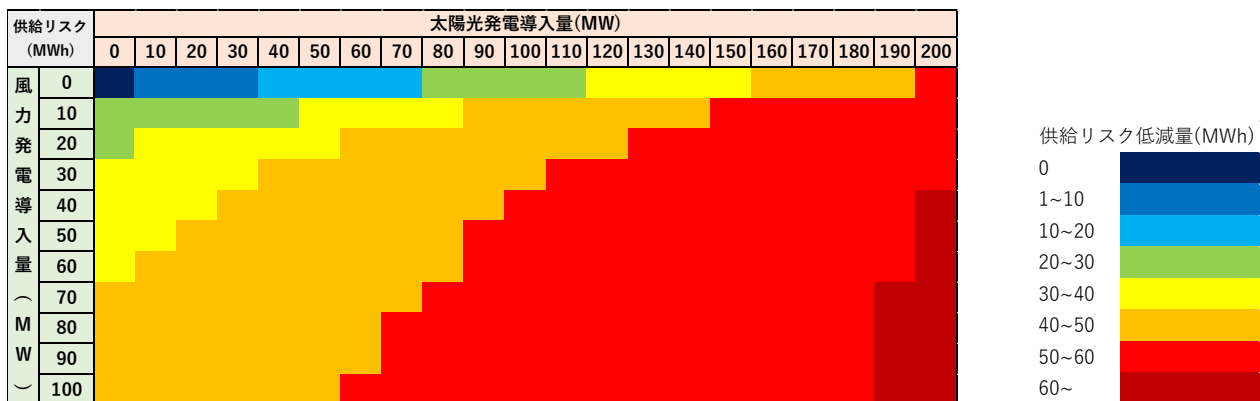


図-2 分散型電源による電力リスク低減量 (MWh/年)

$E_{ph}$ (kWh)は太陽光発電の1時間あたりの発電量、 $P$ (kW)は太陽光発電出力、 $H$ (kWh/m<sup>2</sup>/日)は平均日射量を表す。 $E_{ph}$ (Wh)は風車1基の1時間あたりの発電量、 $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>)は空気密度、 $R$ (m)は風車直径、 $V$ (m/s)は風速を表す。ある地点の出現風速の度数分布関数はワイブル分布に従う。対象地である宮古市の日射量・風況データを表-4に示す。

これらのデータを用いて対象地点への太陽光発電と風力発電の導入量をそれぞれ10MW区切りで変化させた場合の電力リスク低減効果を算出した。風力発電については10MW導入するとき、出力2.5MWの風車を4基導入したと考える。結果を図-2に示す。

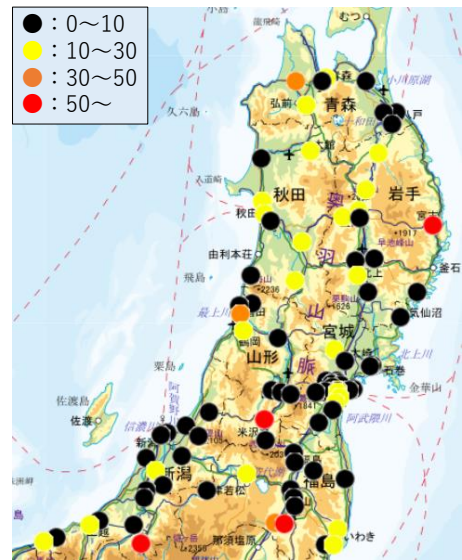


図-1 東北各地の1年あたりの平均電力不足量 (MWh/年)

表-4 対象地点の日射量・風況

太陽光発電の月別平均日射量 (kWh/m <sup>2</sup> /日)												
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
4.74	4.47	4.2	3.92	4.14	3.58	3.81	3.62	3.48	3.87	4.28	4.59	

地上70m付近の風況	
年平均風速(m/s)	6.1
ワイブル分布パラメーター	
c	6.91
k	1.64



### 9. 経済性を考慮した分散型電源の最適導入量

本節では太陽光発電、風力発電の導入にかかるコストを算出し、電力リスク・経済性の2つの側面から見て最適な分散型電源導入量を算出する。

#### (1) 導入コストの算出

電源の導入コスト $C$ (円)は式(12)から求められる。

$$C = C_c X + \sum_t^{20} \frac{C_{OM} X}{(1+r)^t} \quad (12)$$

$C_c$ (円/kW)は電源を1kW導入した際の資本コスト、 $C_{OM}$ (円/kW/年)は電源1kWあたりの年間の維持管理コストであり、 $X$ (kW)は電源導入量を表す。資本コストや維持管理コストは調達価格算定委員会による2023年度の想定値<sup>6)</sup>を用いた。 $r$ は割引率であり、今回は3%とした。

#### (2) 電力リスク低減効果の経済的価値

電力リスク低減効果の経済的な利益は、停電コストに関する指標であるVOLL(円/kWh)を用いて算出した。VOLLは1kWhの電力不足が発生したときの需要家の経済的損失額を表しており、大口事業所では平均で84,100(円/kWh)、中小事業所では平均で13,600(円/kWh)になるとされている<sup>7)</sup>。本研究では平成24年度の工業統計調査<sup>8)</sup>における岩手県の事業所数・事業所規模のデータから、VOLLは64,251(円/kWh)と設定した。

#### (3) 分散型電源の最適導入量

分散型電源を導入することによるコスト及び電力リスク低減効果を含めた総合的な経済性は式(13)で評価する。

$$E = VOLL \times R_{P,W} - (C_p + C_w) \quad (13)$$

$R_{P,W}$ (kWh)は太陽光発電を $P$ 、風力発電を $W$ 導入したときの電力リスク低減量、 $C_p$ (円)、 $C_w$ (円)はそれぞれその際の太陽光発電、風力発電の導入コストを表している。総合的な経済性 $E$ (円)が最大となるときの導入量を最適な分散型電源導入量とする。結果を図-3に示す。結果から太陽光発電を70MW、風力発電を20MW導入した際の経済性評価が最も高いことが分かった。風力発電は図-2からも分かるように、少ない導入量である程度リスク低減効果を見込めることから、一定の導入量を超えると経

済的評価が下がっていると考えられる。一方で太陽光発電は導入コストが比較的小さいため、一定の経済的評価を得られている。

### 10. おわりに

本研究では、電力系統設備の複数の災害に対する被害率を推定し、東北地方の実系統を対象に仮定の災害を発生させてシミュレーションを行って電力リスクを算出した。その結果リスクが比較的高かった岩手県宮古市に太陽光発電と風力発電を導入し、電力リスク低減効果を調べた。さらに、それぞれの電源の導入コストと、電力リスク低減による経済的価値を含んだ総合的な経済性評価を行うことにより、最適な分散型電源導入量を算出した。その結果太陽光発電70MW、風力発電20MWを導入した際の評価が最大となった。

#### 参考文献・出典

- 湯山安由美, 梶谷義雄 2011年東日本大震災のデータに基づく火力発電所の被害・復旧関数の推計 土木学会論文集 A1, Vol. 70, No.4, I\_664-1677, 2014
- 地震ハザードステーション J-SHIS MAP
- フランクリン・ジャパン 落雷日数マップ 2021年度10kmメッシュ
- 藤井健, 光田寧 台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション 京都大学防災研究所年報 第29号 B-1 昭和61年4月
- 光田寧 台風による風災害の予測について 京都大学防災研究所年報 第40号 A 平成9年4月
- 調達価格等算定委員会 令和4年度以降の調達価格等に関する意見 令和4年2月4日(金)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/santecii/pdf/20220204\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/santecii/pdf/20220204_1.pdf) (アクセス日 2023.2.2)
- 国土交通省 都市局; 国際競争業務継続拠点整備事業の費用便益分析マニュアル  
<https://www.mlit.go.jp/common/001239083.pdf> (アクセス日 2023.2.2)
- 経済産業省 工業統計調査 確報 平成24年確報

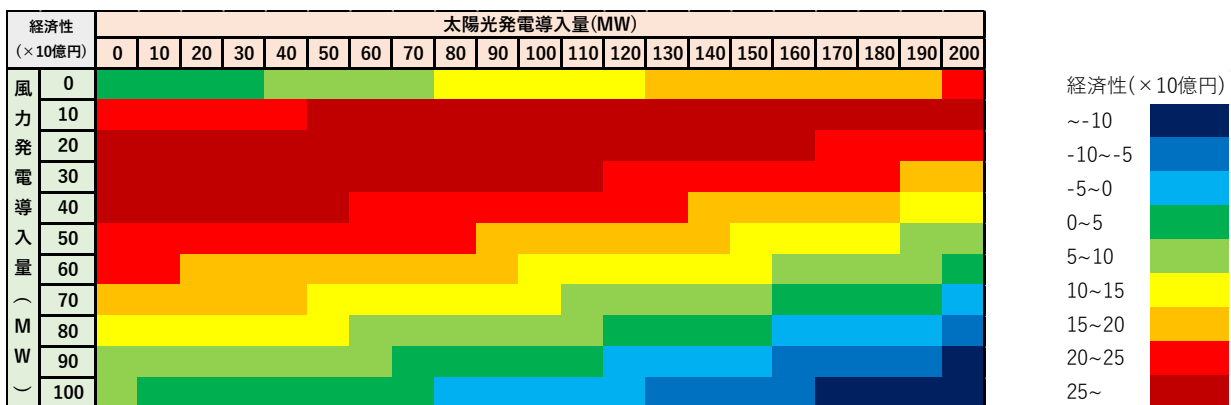


図-3 分散型電源導入コストと電力リスク低減量を考慮した経済性(円)