

Proposal of Simplified System Performance Ratio for Generation Monitoring Service of Small-scale Photovoltaic Power Plants and Statistical Analysis on Long-Term Degradation

Yoh YASUDA^{*1‡}Yasuyuki OKUYAMA^{*2}Toshio DAIMON^{*3}

小規模太陽光発電所の発電電力量監視サービスのための簡易的なシステム出力係数の提案と長期経年劣化統計分析

安田 陽^{*1‡}奥山 恭之^{*2}大門 敏男^{*3}

Abstract

Although many small-scale photovoltaic power plants employ remote sensing systems, these data are merely utilised to operation and maintenance because detail analysis is often needed to recognise plant conditions including weather and other environment information from these csv data. This paper reports a development of a simplified low-cost monitoring service especially for small-scale photovoltaic power plants to estimate damage and trouble factors from fewer monitoring data of generation and public weather information. The authors also propose “Simplified System Performance Ratio (sPR)” that can grab degradation of annual generation of photovoltaic using simple generation monitoring systems and data from neighbouring weather stations. This paper introduces the result of investigation of totally 272 power plants in Japan and relationship between various parameters and sPR’s degradation using regression analyses. The result clarifies that there is a statistically significant correlation between sPR and FIT (Feed-in Tariff) buying price as well as so-called “low-voltage divisions”, which means a group of plants that are intentionally divided into small plants less than 50 kW.

Keywords: Operation and Maintenance (O&M), degradation, shade, failure, multiple regression analysis
キーワード：保守メンテナンス、劣化、影、故障、重回帰分析

1. はじめに

日本では2012年の固定価格買取制度(FIT)の施行後、新規参入する事業者は爆発的に増加しており、例えば10 kW以上50 kW未満の低圧の太陽光発電設備だけでも、2023年度3月末日の段階で73万件を超えている¹⁾。いわゆるメガソーラーなど大規模太陽光発電所ではリアルタイムの遠隔監視システムも具備され、不具合があっても比較的短時間に点検・修理が行われる傾向にあるが、一般に小規模太陽光発電所（本論文では定格出力が10 kW以上

50 kW未満の小規模事業用電気工作物だけでなく、定格出力が50 kW以上2000 kW未満の事業用電気工作物の発電所も「小規模太陽光発電所」として取り扱う）の所有者・運用者の状態監視や保守メンテナンス（以下、O&M）、健全性維持に対する意識は高いとはいえ、発電電力量の経年変化に気がつかない場合も多い。

発電所の所有者は、本来電気事業法によれば事故やトラブルがあった際に全面的に法的責任を負う立場であるが、残念ながら小規模太陽光発電所の場合は発電所の運用を会社に委託したり、自身が運用責任を追っている意識を持っていないケースも多く、あたかもアパート・マンション経営のように考えている所有者も見られている。このような形での電気事業の参入は本来あってはならないことで

*1 Project Professor, Research Project on Renewable Energy Economics, Graduate School of Economics, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan
‡e-mail: yasuda.yoh.85m@st.kyoto-u.ac.jp

*2 Energy Vision Co. Ltd

*3 Japan O&M Association for Renewable Energy

Received: June 14 2023, Accepted: October 19 2023

*1 京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座 特任教授（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

‡e-mail: yasuda.yoh.85m@st.kyoto-u.ac.jp

*2 (株)エナジービジョン

*3 新エネルギーO&M協議会

(原稿受付：2023年6月14日、受理日：2023年10月19日)

あるが、残念ながら日本においては現実に起こっていることである。このような望ましくない状況において、如何にして健全な発電事業を普及促進していくかという再生可能エネルギー発電業界全体の教育啓発も急務である。

したがって、これまで大規模な事業用太陽光発電所向けに高度に開発された監視・診断システムを小規模太陽光発電所に対してそのまま応用することは現実的ではなく、小規模発電所に特化した新たな遠隔監視や O&M 戦略を構築する必要性が生じている。特に小規模発電所の所有者・運用者の遠隔監視や健全性維持に対する意識が大規模太陽光発電所や他の発電方式に比べ相対的に低い可能性もあることを十分認識しながら、この分野での発電所運用の O&M や健全性維持の具体的方法論を構築する必要がある。

太陽光発電所の遠隔監視システムによる劣化診断は、例えば文献 2),3)のようにシステム出力係数に着目した研究開発が比較的早い段階から進んでおり、適切な観測データさえ揃えば遠隔監視データだけで適切な劣化・故障診断やその推測も十分可能となっている。文献 4)では、期待発電電力量と発電電力量実績の差から「年乖離度」という指標が導入され、そこでは 12 ヶ月移動平均を利用した簡易的な分析方法が用いられている。また、文献 5)では出力電力量データのみからでも日陰やインバータ効率等の損失を分離し健全性評価が行えることを明らかにしている。更に文献 6)では、日射量を考慮した発電電力量の長期的傾向とパワーコンディショニングシステム（以下、PCS）間の相対比較を組み合わせた発電阻害要因推定に基づき確に検査や保守点検を行う手法を提案している。

一方、遠隔監視システムは小規模太陽光にも具備されているが、その多くが一定時間ごとに書き込まれた発電電力量等のデータをその時々で比較するに留まっている。また、日射量やモジュール温度等の周辺環境のデータ監視は必ずしも全ての発電所で行われているわけでない。更に、遠隔監視システムが具備されていたとしても、高度な故障判断・推定アルゴリズムを用いたツールが使われているケースは非常に少ない。加えて発電所所有者・運用者の O&M に対する意識も高いとは限らないため、発電電力量の監視データから長期的傾向を抽出し、推定されるべき問題点を把握するには至らないことも多い。遠隔監視システムのデータからそうした問題点を推定し、発電所の検査や点検の前提条件を提供するためには、データを別途解析する必要がある、小規模発電所の所有者・運用者の殆どがこうした活用は行っていないと思料される。

そこで筆者らは、発電所サイトの日射量やモジュール温度などの詳細データがなくても発電電力量の履歴データのみで低コストで中長期の経年劣化が診断できる発電電力量監視システムを開発し、小規模太陽光発電所の所有者・運用者向けにサービスを開始している。本論文では、この発電電力量監視サービスの中核技術となる簡易的な経年劣化診断方法を理論化し、「簡易的なシステム出力係数 (sPR: simplified Performance Ratio)」として提案・定義

する。

また本論文では、同サービスにより取得した全国 272 発電所の発電電力量データを分析し、sPR という新たな指標を用いて発電電力量の長期経年劣化傾向を評価する。そのうち、必要なデータが揃う 242 発電所に対して発電所規模（アレイ定格容量）、事業者規模（所有する発電所のアレイ定格総容量）や FIT 買取価格、低圧分割の有無など、さまざまな変数と sPR の経年変化率との関係を重回帰分析を用いて統計分析を行い、上記のパラメータと経年劣化（すなわち sPR 変化率）との間に統計的に有意な相関関係が見出せることを検証する。

2. 小規模太陽光発電所の 発電電力量監視サービスの開発

前章で述べた小規模太陽光発電所に特有の状況に鑑み、筆者らは、小規模太陽光発電所の発電電力量監視サービスの開発を行なっている。具体的には、主に小規模太陽光発電所の所有者・運用者向けに、発電電力量の監視・解析サービス（以下「本サービス」という）を柱とする新たな O&M サービスが一般社団法人 新エネルギー O&M 協議会および(株)エナジービジョンによって 2020 年から開発・商用化され、データ収集・分析を行っている^{7,8)}。

2.1 発電電力量監視サービスの概要と意義

本サービスは、発電所側では既存の商用遠隔監視システムを用いながら発電電力量の時系列データのみを取得し、それを半自動で分析して、モジュール汚損や樹木・雑草による日陰、インバータの故障、などの発電阻害要因を推定するサービスである。上記の情報に加え、完成図書や過去の保守点検記録等を参照しつつ発電所の所有者・運用者へのヒアリングを通して現状の問題点を把握して整理し、把握した問題点については、その後に実施する検査や点検で確認し、具体の改善方法の提案を提供している。

本サービスを利用する発電所の所有者・運用者の多くは発電所の運転開始（運開）時から本サービスを利用しているわけではなく、原因不明の発電電力量低下に悩まされ、運開から数年経って本サービスを申し込むケースも多い。したがって、本サービスの主な目的は、リアルタイムで故障や不具合を察知しその原因を推定することではなく、過去の発電電力量の履歴データに遡って中長期的な発電電力量低下の原因を推定することにある。また、原因の推定にあたっては、高度なアルゴリズムを用いて精度高く推定を行うことが目的ではなく、少ない情報量を元に最終的に現地での確認と問題改善のための措置を効率的に行うための意思決定の補助が目的である。原因の推定に関しては本論文の範囲外ではあるが、関連文献として文献 9),10)を参照のこと。

本サービスは単なる遠隔監視や劣化・故障診断、発電所健全性評価といった技術サービスという位置付けに留まらない。これまで事業の根幹である発電電力量に通常の劣

化を超える減少が生じているとは努々思っていなかった小規模太陽光発電所の所有者・運用者に対して、この事実を可視化して提供することで発電所の新設時の問題点の把握や維持管理の重要性の認識を高めることが可能となる。このように、小規模太陽光発電所所有者・運用者の意識向上や安全性の普及啓発に役立つことも目的のひとつである。

更に、新設時に由来する問題点やその後の故障、事故など地域住民とのトラブルに至る可能性のある要因を早期発見・未然防止し、地域社会に受け入れられる再生可能エネルギー発電所を健全に運用することは、発電所の収益性向上だけでなく、日本および地球全体の再生可能エネルギー導入率の向上に役立つものとなる。

2.2 発電電力量監視サービスにおける長期劣化の把握

本サービスの特徴は、発電所から取得するデータは発電出力の時系列データ（時間毎出力および月間発電電力量のデータ）のみであり、その他の気象・環境データは不要な点である。特に小規模な発電所によってはサイトでの日射量やモジュール温度の計測が行われていないケースが少なくないため、このような簡易な推定が重要となる。また、できるだけ少ないデータで発電阻害要因の把握を行うことにより、サービス全体の設計・運用コストを低減させ、更にはサービス利用者（発電所所有者・運用者）の心理的負担や障壁を緩和させる目的もある。

しかしながら、発電電力量のデータの数値やグラフ描画だけでは、通常の経年劣化を超える減少があったとしてもその傾向を見落とす可能性もある。本節ではまず、そのようなケースを検証し、対策を検討する。

図 1(a)は発電所 Z における月間発電電力量の経年変化を示したグラフである。

グラフ横軸は、観測開始月からの経過月を年単位で表示

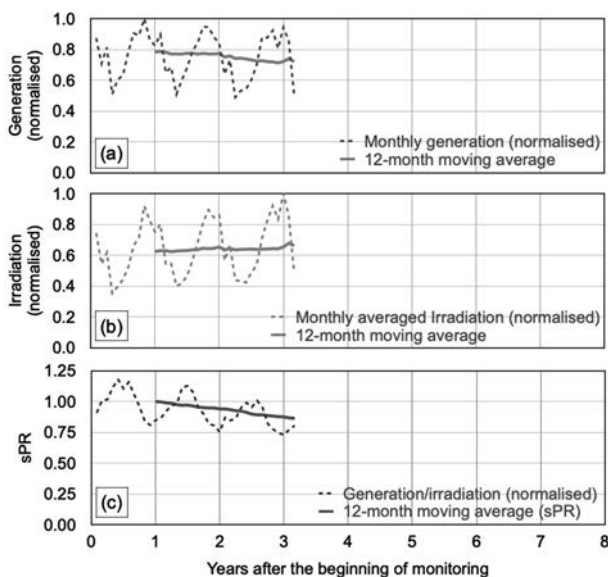


Fig.1 Time-series monitoring information on Plant Z

図 1 発電所 Z の時系列監視情報

したものである。ここで観測開始月は観測開始日の翌月（すなわち月初から月末までの 1 ヶ月間の観測データが揃う最初の月）と定義する。なお、本サービスにおいて運転開始月ではなく観測開始月を用いる理由は、本サービスを申し込む発電所によっては運転開始日と観測開始日が異なる場合もあるからである。また、正確な運転開始日の記録が発電所所有者・運用者の手元になく、その情報を探すのに手間取り本サービスの利用を諦めてしまうという心理的障壁をできるだけ緩和するためでもある。

図(a)の縦軸は、各発電所の規模（設備容量）に依存しないよう、観測期間内の月間発電電力量の最大値を 1 として規格化した値でグラフの縦軸を描画している。発電所の規模に関しても、本来正確性を期すのであれば設計図書にあたってアレイ定格容量（直流）、インバータ定格容量、送配電事業者と契約する発電所出力端容量（交流）などを確認する必要があるが、上記の通り、発電所の所有者・運用者によってはその正確な情報を確認することが本サービスや O&M に対する投資の心理的障壁になる可能性もあるケースも少なくない。そのため、既存の発電電力量の履歴データセットのみ発電所所有者・運用者から提供してもらえれば、他の付加的な情報の聞き取りや確認をすることなく、提供データのみから解析を行うサービスを構築することが重要となる。

また、各グラフには 12 ヶ月後退移動平均（ある月のデータに対して過去 11 ヶ月分を含めた計 12 個データを平均したもの）も実線で示している。この 12 ヶ月後退移動平均は、季節による中期的変動を除去し、長期的な変動、すなわち発電電力量の経年劣化を数値化・視覚化するためのものである。12 ヶ月後退移動平均は文献 4)でも見られる手法であり、グラフ描画した際に経年劣化を視覚的に把握することには一定の効果がある。

しかしながら、図 1(a)の事例で 12 ヶ月移動平均値の推移（点線）を見ても、発電電力量の低下はわずかにしか見られず、直感的には通常想定される太陽光モジュールの経年劣化以外の原因で発生する劣化や故障はないものと判断されてしまう可能性がある。

一方、図(b)のような近隣の気象庁地上気象官署の水平面全天日射量データ¹⁾を取得し、観測期間内の月間水平面全天日射量の最大値を 1 として規格化した値でグラフ化すると、観測開始 2 年目および 3 年目の日射量は観測開始年よりそれぞれ 2.5%、5.0%ほど高いという観測結果が得られている。ここで近隣の水平面全天日射量データを用いる理由は、前述の通り小規模太陽光発電所によっては発電所サイトに日射計が具備されていないケースも多いからである。したがって、近隣の水平面全天日射量データを用いることで、発電電力量の履歴データのみという少ないデータセットでも簡易的な分析が行えるという設計コンセプトは本サービスにとっても重要な特徴となる。近隣データセットを用いることで発生が予想される誤差については、次章で検証

する。

以上のように、図(a)で発電電力量の12ヶ月後退移動平均による長期劣化傾向がわずかであると判断されたとしても、図(b)のように同時期に日射量が増加している場合もある。そこで、図(c)のように月間発電電力量を近隣観測地点の月平均水平面全天日射量データで除した数値の12ヶ月後退移動平均を正規化した値で評価すると、直近の値は0.863となり、これを年変化率に換算すると-6.7%となることが明らかとなった。

このような分析に基づき発電所所有者に勧告を行い、実際に現地を確認したところ、モジュールの下端の汚れの固着とPCSのファンの故障による温度上昇抑制機能の過剰動作が確認され、早期に対策を行うことを勧告した。このように、①月間発電電力量の12ヶ月後退移動平均を評価すること、②近隣観測地点の月平均水平面全天日射量データを取得し評価すること、の2つの方法により、発電所から提供される発電電力量の履歴データのみから長期的経年劣化の傾向を可視化することが可能となる。

この「月間発電電力量を近隣観測地点の月平均水平面全天日射量データで除した数値の12ヶ月後退移動平均を正規化した値」は、システム出力係数とほぼ同等の意味を持つため、本論文では「簡易的なシステム出力係数 (sPR: simplified Performance Ratio)」と呼ぶこととする。sPRの数学的な定義は第3章にて詳述する。

このsPRという新たな指標を評価することによって、若干の不確実性があるものの、発電所の所有者・運用者にとっては付加的な計測機器設置や遠隔監視システムの変更をする必要がなく、最小限のデータの提供のみで診断サービスを受けることが可能となる。これにより、低コスト化が実現でき、更に利用者の心理的障壁が少ない利用しやすいサービスの提供が実現できる。

3. 簡易的なシステム出力係数(sPR)の理論

日本産業規格 JIS C 8960:2012¹²⁾に従うと、太陽光アレイのシステム出力係数 P_R (本論文では月毎とする) は、以下のように定義される。

$$P_R(m) = \frac{E_{PCO}(m) \times G_S}{H_A(m) \times P_{AS}} \quad (1)$$

ここで、 m は測定開始月を1とする月番号、 E_{PCO} は月間発電電力量 [kWh/月]、 P_{AS} はアレイ定格出力 [kW]、 G_S は標準試験日射強度 [kW/m²]、 H_A はサイトでの月間傾斜面全天日射量 [kWh/m²/月] であり、このうち E_{PCO} と H_A は m に依存する変数である。

本論文の目的は、システム出力係数 P_R を正確に知ることではなく、少ない情報量と低コストかつ簡便な方法で P_R の相対的な変化 (経年変化) を把握することにある。そこでまず、全測定期間の最大値で割って正規化した P_R を求めることで、システム出力係数の相対的経年変化を把握することを考える。正規化したシステム出力係数を nPR と

おくと、(1)式は(2)式のように修正でき、結果的に測定期間を通じて変動しない P_{AS} および G_S を(1)式から省くことができる。

$$\begin{aligned} nPR(m) &\equiv \frac{P_R(m)}{\max[P_R(m)]} \\ &= \frac{\frac{E_{PCO}(m) \times G_S}{H_A(m) \times P_{AS}}}{\max\left[\frac{E_{PCO}(m) \times G_S}{H_A(m) \times P_{AS}}\right]} \\ &= \frac{\frac{E_{PCO}(m)}{H_A(m)}}{\max\left[\frac{E_{PCO}(m)}{H_A(m)}\right]} \quad (2) \end{aligned}$$

ここで前述の通り、中小規模の太陽光発電所ではサイトで日射量を計測していないことも多いため、サイトから最も近い気象観測地点の水平面全天日射量公開データを用いた近似的な月間日射量 H_A^* を(2)式の H_A と置き換え、近似的な正規化システム出力係数 nPR^* を求めると、式(3)のようになる。

$$nPR^*(m) \equiv \frac{\frac{E_{PCO}(m)}{H_A^*(m)}}{\max\left[\frac{E_{PCO}(m)}{H_A^*(m)}\right]} \quad (3)$$

なお、(2)式の H_A は傾斜面全天日射量であり、(3)式の H_A^* は水平面全天日射量である。一般に、Erbs モデル¹³⁾ および Perez モデル¹⁴⁾ などから求めた水平面散乱日射量や傾斜面散乱日射量推定では両者の関係は必ずしも線形ではない。しかし、(2)および(3)式で見られるように正規化しているため、気象観測地点の水平面全天日射量を用いた nPR^* は実サイトの正規化されたシステム出力係数を nPR を十分近似しているとみなすことができる。

更に、各月の nPR^* は季節変動があるため、年単位の長期的な経年変化 (多くは経年劣化) を発電電力量の時系列グラフから視覚的・直感的に把握することは難しい場合もある。そこで、季節変動成分を除去するために、 nPR^* の12ヶ月後退移動平均を取ると、次式のように表すことができる (但し $m > 12$) 。

$$sPR(m) \equiv \frac{\frac{\sum_{i=0}^{11} \frac{E_{PCO}(m-i)}{H_A^*(m-i)} / 12}{\max\left[\frac{\sum_{i=0}^{11} \frac{E_{PCO}(m-i)}{H_A^*(m-i)} / 12\right]}}{\max\left[\frac{\sum_{i=0}^{11} \frac{E_{PCO}(m-i)}{H_A^*(m-i)} / 12\right]}} \quad (m \geq 12) \quad (4)$$

本論文では、式(4)を簡易的なシステム出力係数 sPR (Simplified System Performance Ratio) と定義する。

なお、式(3)において近隣の気象庁地上気象官署の水平全天日射量 H_A^* を参照する場合、当該都道府県に全天日射量を計測する観測地点がなかったり、県境の発電所では発電所が所在する都道府県でなく隣接した都道府県の気象観測地点の方が近い場合もある。その場合、異なる都道府県の気象観測地点の日射量の絶対値に差があっても相対的傾向であれば、どちらの気象観測地点の値を用いても結

Table 1 Example of correlation coefficients of monthly solar radiations among neighboring weather stations

表 1 隣接気象観測地点間の月平均日射量の相関係数の例

	Sendai	Morioka	Akita	Yamagata	Fukushima
Sendai	1				
Morioka	0.9420	1			
Akita	0.8800	0.9693	1		
Yamagata	0.9497	0.9791	0.9667	1	
Fukushima	0.9846	0.9448	0.8970	0.9671	1

	Tsukuba	Fukushima	Utsunomiya	Maebashi	Choshi
Tsukuba	1				
Fukushima	0.9584	1			
Utsunomiya	0.9721	0.9649	1		
Maebashi	0.9793	0.9684	0.9853	1	
Choshi	0.9814	0.9342	0.9297	0.9479	1

果に大きな差は生じないと考えられる。

一例として、表 1 に宮城県と茨城県をそれぞれ中心とした隣接気象観測地点で 2012～2021 年の 10 年間に観測された月平均値全天日射量¹⁾間の相関係数を示す。仙台と秋田、および福島と秋田の間を除き、相関係数が 0.9 を超え極めて高い相関があることがわかる。一方、雪国とそれ以外の地域の選択は、相関係数が僅かながら 0.9 を下回るため、sPR の傾向を把握する上では実用上問題はないが、発電所の所在地の気象状況に十分留意して行う必要がある。

4. sPR による分析と劣化・故障の事例

本サービスでは開発段階から従来型の保守点検を受託している発電所や相談に応じた先など 272 の発電所から発電電力量の時系列データを取得し蓄積している。その中から、劣化・故障の典型とみられる事例を紹介し、そこから得られる特徴と発電事業者からのヒアリング・提供資料や現地視察等によって特定された要因との比較を行う。

図 2 は本サービスに利用を申し込んだ発電所 A～E の sPR の観測開始後の年次変化を表したグラフである。いずれも本サービスの利用は運用と同時になく、運用後数年経って発電所の健全性の確認や発電電力量低下の原因推定のために本サービスに申し込み、発電電力量の履歴データを過去に遡って検証する形を取っている。

発電所 A は、観測開始後約 6 年が経過しているが、sPR に目立った低下はなく、直近 sPR から換算される経年変化率は $-0.1\%/年$ であり（「変化率」の詳細定義は第 5 章参照のこと）、劣化や故障の兆候は見られない適切に管理された発電所の事例である。

発電所 B は、予期せぬ故障による急激な低下の傾向は見られないものの、直近 sPR から換算される経年変化率は $年-1.3\%$ と算出されている。発電事業者への聞き取り調査では一部 PCS の不具合があった。この経年低下は PCS

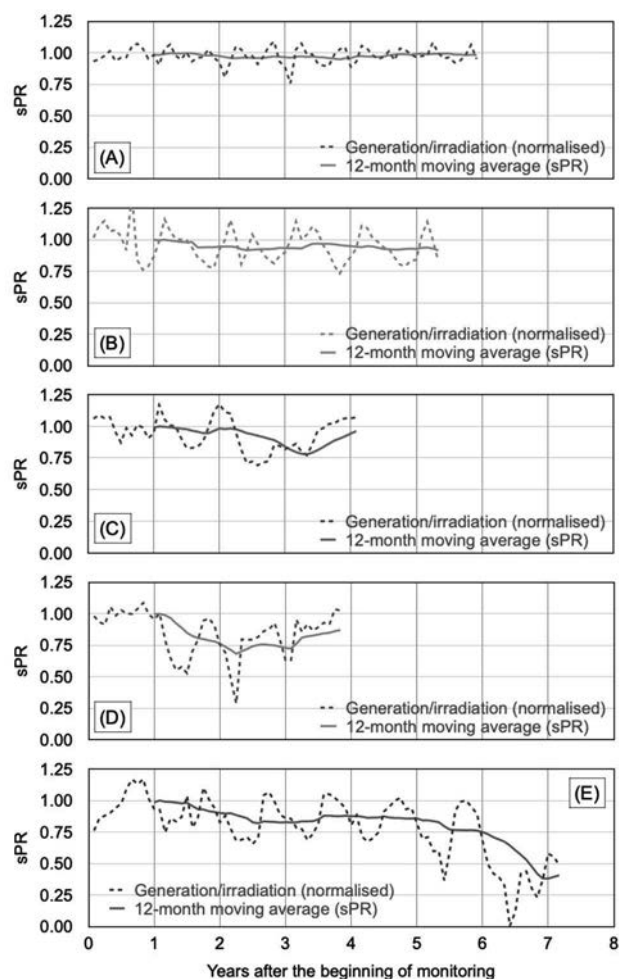


Fig. 2 Time-series sPR on Plants A to E

図 2 発電所 A～E の sPR 時系列波形

の不具合と太陽光アレイの効率の劣化の複合要因の可能性が考えられ、これ以上変化率が悪化しないかどうか推移を見守る必要がある。

発電所 C は観測開始後 3 年目で sPR が急激かつ急激に低下した例であり、現地調査を行ったところ、発電所内の雑草により影が発生し、発電電力量が急激に低下したということが判明した。このケースでは実際の草刈り作業の着手までに時間がかかったため、発電阻害要因が判明してからその除去に数ヶ月かかったが、その後は良好に sPR が回復している。

発電所 D は観測開始後 2 年目および 3 年目に sPR が急激に低下した例であり、現地調査によりやはり発電所内の雑草による影の影響によるものであることが判明した。草刈りおよび除草剤散布により、現在は良好に sPR が回復している。

発電所 E は観測開始後 5 年間も徐々に経年劣化が認められていたが、6 年目に長期停止して月間発電電力量がゼロになった月もあり、sPR が急激に低下した事例である。これは現地調査の結果、PCS 故障であることが確認され、

約 2 ヶ月に亘る PCS 交換の後、現在は回復傾向を見せている。

このように、sPR の時系列データを分析するだけでも発電阻害の状況がある程度推測できることがわかる。この情報をもとに発電所所有者・運用者に売電収入の減少が生じている現状を認識せしめることで注意喚起を行い、現地調査や聞き取り調査のサービスを行うことで阻害要因特定とその除去が可能となる。発電阻害要因の特定に関しては本論文の範囲外ではあるが、関連文献として文献 9)、10) を参照のこと。

5. 全国 272 ヶ所の小規模太陽光発電所の統計分析

前章で提案した簡易的な出力係数 sPR を用いて、本サービスを申し込みデータ提供があった全国 272 ヶ所の小規模太陽光発電所の年次変化の統計分析を行う。

図 3~5 に 272 発電所の属性として、発電所規模（アレイ定格容量（直流））、FIT 買取価格、低圧分割の有無の分類を示す。

なお、アレイ定格容量は、サービス契約時にその情報が提供されたサイトについては申告通りの数値を採用し、提供がないサイトについては、設備容量が申告された発電所 99 件 (272 件中 36%) の月間発電電力量が最大となる月の設備利用率の平均値 18.7% を参考に、実際の月間発電電力量から推定した値を用いている。

また、本サービスに申し込む所有者・運用者の中には発電所諸元が十分把握できていないケースも多く、発電所出力端設備容量（交流）や発電開始年については情報欠損が多いため、今回の統計分析では分析対象の変数としない。

また、低圧分割の有無は発電所や名称（多くは連番あり）や諸元から明らかに低圧分割であると判断できるものを「分割あり(Yes)」とし、それ以外を「分割なし(No)」とした。

図 6 に、272 発電所全ての sPR の年次変化時系列波形を示す。なお、sPR は 12 ヶ月後退移動平均を取っているため、測定開始月から 1 年間はデータが定義されない。

また、各発電所所有者・運用者から提供されるデータは月毎の発電電力量データであり、データに欠損がある場合はその月の発電電力量をゼロとして取り扱った。そのため、図 6 に見る通り、いくつかの発電所（具体的には 4 発電所）で sPR が 0~0.2 付近まで大きく低下しているものもある。この期間のなだらかな下降・上昇曲線は 12 ヶ月移動平均によるものである。発電所の何らかの事故や故障で発電電力量がゼロとなった場合、本来であれば直ちに事故や故障を察知し早期に復旧することが望ましいが、小規模太陽光発電所においてはこのような異常事態を察知できず、数ヶ月経ってから異常事態を察知する認識するケースもあり、大規模太陽光発電所で通常行われる監視・運用と

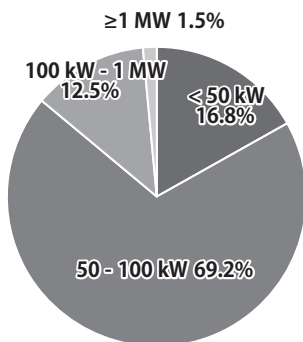


Fig. 3 Classification by panel capacity among 272 plants
図 3 272 発電所のアレイ定格容量による分類

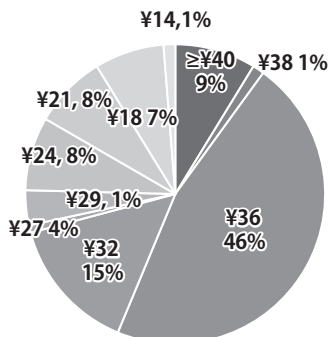


Fig. 4 Classification by FIT buying price
図 4 FIT 買取価格による分類

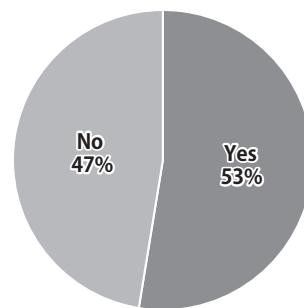


Fig. 5 Classification by low-voltage division
図 5 分割の有無による分類

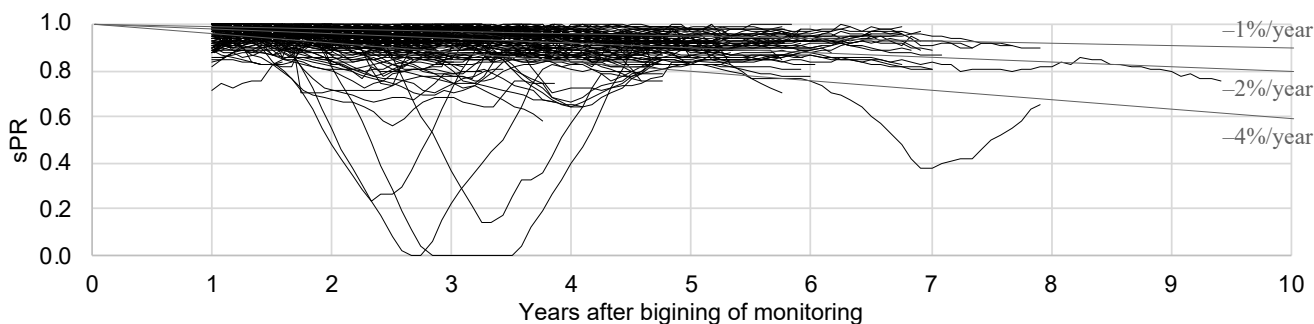


Fig. 6 Total trend of time-series sPRs of 272 Plants

図 6 272 発電所の sPR の時系列波形の全体傾向

異なるのが実態である。

図6では同時にsPR変化率が-1%/年,-2%/年および-4%/年に相当する直線が引かれているが、このグラフから、測定開始からわずか1~4年程度でsPR変化率が-4%/年を下回った発電所も複数確認できる。

この傾向をより定量的に評価するために、本研究では「sPR最低値 sPR_{lo} 」と「sPR直近値 sPR_{la} 」の2つの指標を定義する。sPR最低値とは、ある発電所の観測期間内で月間sPRが最も低下した月のsPR値であり、sPR直近値は観測期間内でデータが存在する最も新しい月のsPR値と定義する。なお、sPR直近値は必ずしも「現在」（もしくはそれに近い月の）データでない場合があることに留意が必要である。なぜならば、ある期間のみ本サービスを利用し、その後発電は継続するもののサービス契約を更新せずデータの提供がない発電所もあるからである。

また、sPR最低値 sPR_{lo} と sPR直近値 sPR_{la} に対して、両者の「変化率 CR: Change Ratio」をここでは定義する。すなわち「sPR最低値の変化率 CR_{lo} 」は、観測開始月の前月（すなわち0年0月目）における当該発電所のsPRを発電電力量の劣化がない健全な状態と仮定し $sPR = 1$ と置き（これを初期点とする）、sPR時系列グラフにおいて初期点とsPR最低値の点を結んだ直線の傾きと定義できる。同様に「sPR直近値の変化率 CR_{la} 」も初期点とsPR直近値の点を結んだ直線の傾きと定義できる。

ある実際の発電所のsPR時系列曲線を例にとり、sPR最低値 sPR_{lo} と sPR直近値 sPR_{la} 、ならびにsPR最低値の変化率 CR_{lo} と sPR直近値の変化率 CR_{la} の幾何学的説明をしたものを図7に示す。

図7の直線は、測定開始後6年目にあるトラブルで急激にsPRが低下し、その後、本サービスによって適切な回復措置が取られてsPRが改善傾向に向かっている発電所の時系列データの事例である。このように、ある発電所で測定開始以降最もsPRが悪化した時の値と直近のsPRの値とは異なることが多い。もちろん両者が一致する発電所もあるが、それらは直近まで大きなトラブルがなく経年劣化によりsPRの低下が漸減しているものや、トラブルがあった直後で本サービスによる回復措置がまだ取られ

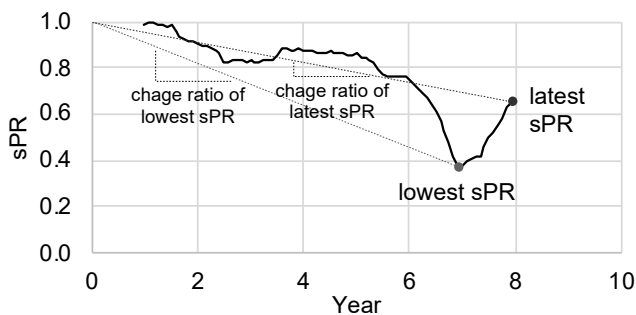


Fig. 7 Illustrative definition of “lowest sPR” and “latest sPR”

図7 「sPR最低値」と「sPR直近値」の定義の説明図

ていないケースとなる。

以上のようなsPR最低値とsPR直近値の特徴的なポイントに着目し、年変化率に従って全272発電所の傾向を分類すると、表2のようにまとめることができる。また、sPR最低値の変化率 CR_{lo} と sPR直近値の変化率 CR_{la} の度数分布図（ヒストグラム）を図8に示す。

特に変化率-4%を重要な閾値として考え、経年劣化がレベルIVの状態に陥っているかあるいはレベルI~IIIに留まっているかに着目して CR_{lo} と CR_{la} でクロス分析すると表3のようになる。この表からまず、sPR最低値の変化率 CR_{lo} がレベルI~IIIの範囲内にある167発電所は全てsPR直近値の変化率 CR_{la} もレベルI~IIIに留まっていることがわかる（これはsPR最低値および直近値の定義上、当然である）。一方、 CR_{lo} が一時的にレベルIVに陥ったもののその後 CR_{la} がレベルI~IIIに回復した発電所は75発電所、十分回復せずレベルIVに留まっているものは30発

Table 2 Classification according to change ratio of sPR

表2 sPRの変化率に基づく分類

level	change ratio per year	Lowest		latest	
		number of plants	ratio	number of plants	ratio
I	> -1%	12	4.4%	73	26.8%
II	-1~-2%	62	22.8%	96	35.3%
III	-2~-4%	93	34.2%	73	26.8%
IV	≤ -4%	105	38.6%	30	11.0%
sum		272	100.0%	272	100.0%

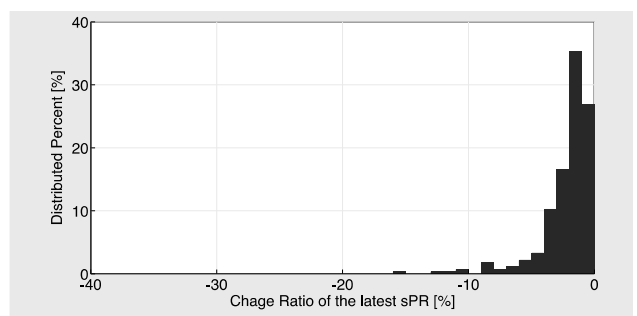
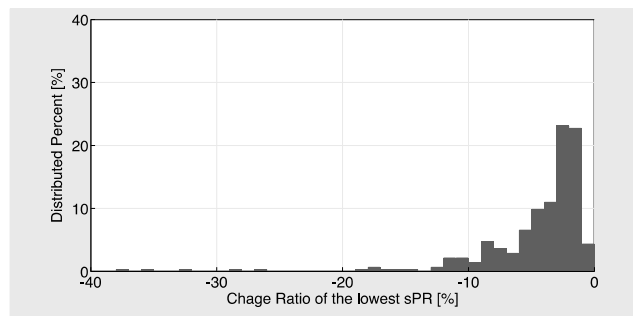


Fig. 8 Histograms of change ratios of the lowest sPR (upper) and the latest sPR (lower) among 272 plants

図8 272発電所のsPR最低値（上図）とsPR直近値（下図）の度数分布図

Table 3 Cross Analysis on sPR change ratio and level

表3 sPR の変化率とレベルに関するクロス分析

	CR_{lo} Level I-III	CR_{lo} Level IV	sum
CR_{la} Level I-III	167	75	242
CR_{la} Level IV	0	30	30
sum	167	105	272

電所あるということがわかる。

今回対象となった発電所は、本サービスに申し込むにあたって発電電力量の低下のリスクを認識し、それなりに保守点検が実施されているなど、小規模太陽光発電事業者の中でも比較的メンテナンスに意識の高い事業者であるとみなすことができる。しかし、それでも約4割の発電所が過去に何らかの形で sPR を年変化率-4%よりも更に低下させていることが表2の結果から明らかになった。但し、表3のクロス分析の結果から sPR 直近値を見ると、一時的に sPR が低下したとしてもその後なんらかの改善措置を取ることによって、最終的には年変化率-4%よりも低下させている発電所は全体の約1割程度に留まることもわかる。

6. 重回帰分析による統計分析

前章で分析した sPR の経年変化の傾向が、発電所の属性(アレイ定格容量, FIT 買取価格, 低圧分割の有無など)とどのような関係にあるのかを調べるために、本章では統計ソフト STATA/MP 17.0 を用いて重回帰分析を行なう。

6.1 単回帰分析による相関グラフの確認

まず、予備的調査として、単回帰分析による相関関係をグラフ描画により確認することとする。図9は sPR 変化率とアレイ定格容量(対数値)の2つの変数の相関グラフである。ここでは sPR 変化率は sPR 最低値の変化率 CR_{lo} と sPR 直近値の変化率 CR_{la} の2つに分けて青と橙のプロットで色別に描画されている。この図から CR_{lo} , CR_{la} とアレイ定格容量との間の相関係数 R はそれぞれ 0.056 および 0.082 と得られ、相関はほとんどないと見ることができる。

同様に、FIT 買取価格と sPR の2つの変数に対して相関グラフを作成すると、図10のようになり、図から CR_{lo} , CR_{la} と FIT 買取価格との間の相関係数 R はそれぞれ 0.062 および 0.166 と得られ、こちらも両者の関係はほとんど相関がないように見られる。

6.2 重回帰分析による統計的有意性の検証

しかしながら、上記の相関グラフはあくまでそれぞれの単回帰分析を行なった結果に過ぎず、いくつかの説明変数と被説明変数の関係の直感的な把握に過ぎないことに留意すべきである。実際は複数の説明変数によって被説明変

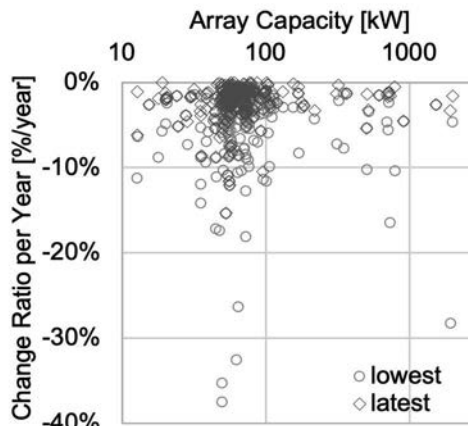


Fig. 9 Correlation between panel capacity and sPR change ratios

図9 アレイ定格容量と sPR 変化率の相関

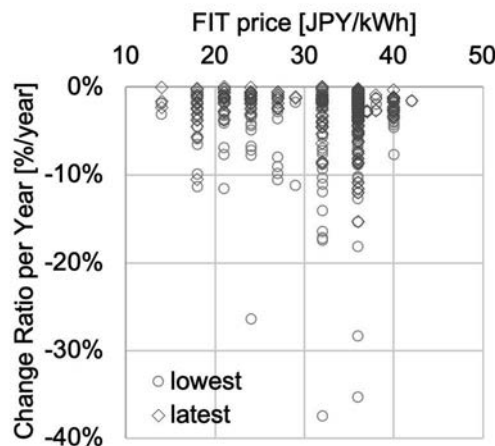


Fig. 10 Correlation between FIT price and sPR change ratios

図10 FIT 買取価格と sPR 変化率の相関

数が記述される説明モデルを用いて重回帰分析を行わないと、どの説明変数が結果的に被説明変数に影響を与えているのかを定量的に分析することはできない。そこで、本論文では、次式のような説明モデルを用いて重回帰分析を行った。

$$CR = \beta_1 P_{fit} + \beta_2 \log(C_{array}) + \beta_3 L_{longi} + \beta_4 L_{longi} + \beta_5 P_{mes} + \beta_6 D_{div} + \epsilon \tag{5}$$

ここで左辺の被説明変数 CR は sPR 最低値の変化率(CR_{lo})または sPR 直近値の変化率(CR_{la})であり、右辺の6つの説明変数 P_{fit} , C_{array} , L_{longi} , L_{longi} , P_{mes} , D_{div} は、それぞれ、FIT 買取価格、アレイ定格容量(直流)、発電所緯度、発電所経度、経過年数(観測期間)、低圧分割の有無である。これらの被説明変数の値は正規化処理などのデータ加工は行っていない。低圧分割の有無 D_{div} は 0 または 1 で表されるダミー変数として取り扱う。 β_n は偏回帰係数、 ϵ は誤差項である。

発電所緯度・経度は本来、発電所設置サイトの正確な位置情報に基づくべきであるが、本サービスを利用するにあたって発電所住所の提供は必ずしも必要な情報ではないため、この情報が提供されない発電所も多い。そのため、発電所サイトがある都道府県庁所在地の緯度・経度で代用した。また、経過年数については、発電所運開からの運用期間で評価するのが理想だが、同様にこの情報が提供されない発電所も多いため、月間発電電力量のデータが存在する観測期間で代用した。

表 4 は式(5)で表される説明モデルで被説明変数を sPR 最低値の変化率 CR_{lo} とした場合に、242 発電所のデータセットを用いて重回帰分析を行なった結果である(今回対象の 272 発電所のうち、必要情報の欠損などにより重回帰分析用のデータセットとして用いることができたのは 242 発電所であった)。決定係数は 0.0461、自由度調整済み決定係数は 0.0218、共線性の度合いを示す分散拡大係数(以下、VIF)は 2.09 であった。

表 4 中第 5 列は有意確率を示す P 値を示しているが、いずれの説明変数の P 値も一般に統計的な有意水準とされる 0.01 を大きく上回っており、統計的に有意な相関関係がない結果となった。このことから、さまざまな発電障害に起因する発電電力量の大きな低下は FIT 価格やアレイ定格容量、発電所位置、経過年数や分割の有無に関係するとは言えず、どの発電所でも起こり得るものと解釈することができる。

一方、被説明変数を sPR 直近値の変化率 CR_{la} とした場

Table 4 Result of multiple regression analysis in case of change ratio of lowest sPR CR_{lo} as the explained variable

表 4 sPR 最低値の変化率 CR_{lo} を被説明変数とした場合の重回帰分析の結果

variables	CE	SE	t	P	95% CI	
FIT price: P_{fit}	0.067	0.074	0.91	0.365	-0.079	0.213
capacity: $\log(C_{array})$	-0.962	0.454	-2.12	0.035	-1.856	-0.068
latitude: L_{lat}	0.113	0.380	0.30	0.766	-0.635	0.862
longitude: L_{long}	0.212	0.150	1.41	0.160	-0.084	0.508
period: P_{mes}	-0.481	0.326	-1.48	0.141	-1.124	0.161
division: D_{div}	-1.130	0.733	-1.54	0.125	-2.575	0.315
(constant)	-33.118	14.424	-2.30	0.023	-61.534	-4.702

CE: coefficient, SE: standard error, CI: confidential interval

Table 5 Result of multiple regression analysis in case of change ratio of latest sPR CR_{la} as the explained variable

表 5 sPR 直近値の変化率 CR_{la} を被説明変数とした場合の重回帰分析の結果

variables	CE	SE	t	P	95% CI	
FIT price: P_{fit}	-0.107	0.032	-3.35	0.001	-0.171	-0.044
capacity: $\log(C_{array})$	0.002	0.197	0.01	0.991	-0.385	0.390
latitude: L_{lat}	-0.080	0.165	-0.49	0.626	-0.405	0.244
longitude: L_{long}	0.072	0.065	1.11	0.267	-0.056	0.201
period: P_{mes}	0.472	0.141	3.34	0.001	0.194	0.751
division: D_{div}	-0.299	0.318	-0.94	0.347	-0.926	0.327
(constant)	-7.819	6.254	-1.25	0.212	-20.140	4.501

合の結果を表 5 に示す。決定係数は 0.1184、自由度調整済み決定係数は 0.0958、VIF は 2.09 であった。この表から、FIT 買取価格 P_{fit} および経過年数 P_{mes} に対する P 値が 0.001 となっており、この 2 つの説明変数と被説明変数 CR_{la} の間に統計的に有意な相関関係があることが確認された。

また表 5 から、FIT 買取価格 P_{fit} に対する偏回帰係数(表中第 2 列)は -0.107 となり、負の値を示していることが見て取れる。この偏回帰係数の 95%信頼区間は表中第 6~7 列に示されるとおり -0.171~-0.044 となる。このことから、FIT 買取価格が高いほど sPR 直近値の変化率が有意に低下する(すなわち悪化する)ことがわかる。このことから、FIT 買取価格が高い発電所所有者・運用者ほど発電電力量の低下を十分に防ぎ切れていない傾向があると解釈することができる。

更に表 5 からは、経過年数 P_{mes} に対する偏回帰係数は 0.472 であり、95%信頼区間は 0.194~0.751 と正の値を示していることがわかる。このことから、sPR 直近値は経過年数が長いほど変化率が改善する傾向にあることがわかる。

なお、一般に FIT 買取価格が高い方が発電所の運開が早く運用期間が長いと考えられがちであるが、実際には FIT 認定を受けてから運開までに時間のかかるケースも多く、また、運用中に本サービスの契約を更新せず途中からデータの提供がないケースもある。本論文で扱った 242 発電所で評価しても FIT 買取価格と経過年数(=観測期間)の相関は図 11 に示す通りプロット点が広く分散しており、相関係数も 0.66 と強い相関とは言えない。したがって、表 4 の重回帰分析の結果から「FIT 買取価格が高いほど sPR 直近値の変化率が大きく、かつ、経過年数が長いほど sPR 直近値の変化率が小さい」という、一見相矛盾する傾向が統計的に有意に得られることが理解できる。

6.3 低圧分割に関する分析

低圧分割の有無について分析すると、sPR 変化率の分布は図 12 の箱ひげ図に見るようなものとなる。sPR 最低値

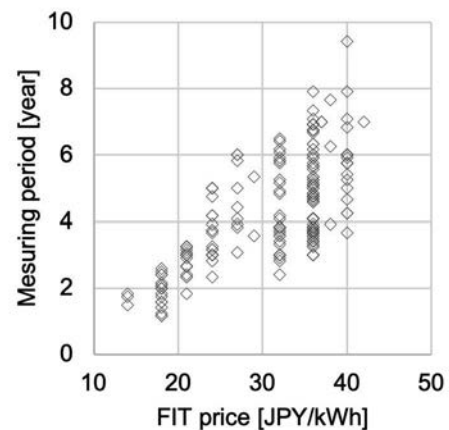


Fig. 11 Correlation between FIT price and measuring period

図 11 FIT 買取価格と観測期間の相関

の変化率 CR_{lo} については分割なしの平均値が-4.359%、分割ありの平均値が-5.040%、sPR 直近値の変化率 CR_{la} については分割なしの平均値が-1.753%、分割ありの平均値が-2.584%となり、いずれも分割ありの方が変化率の平均値が低下（悪化）していることがわかる。但し、図 12 に見る通り両者の 95%信頼区間は重なっており、統計的に有意な差があるとは言えない。更に、表 4 および表 5 の結果からも、低圧分割の有無（ダミー変数）に関して有意な関係は見出せなかった。

しかしながら、242 の発電所から低圧分割のグループ（133 発電所）を抽出し、sPR 直近値の変化率に対して重回帰分析を行ったところ、表 6 のような結果が得られた。表 6 から、FIT 買取価格に対する P 値が 0.002 と統計的に有意水準を下回っており、統計的に有意な相関があることがわかる。また、この偏回帰係数は-0.208 であり、95%信頼区間は-0.334~-0.081 であると得られた。

なお、表 7 に示すように、低圧分割を行っていない発電所群に対しては、いずれの説明変数も統計的に有意な関係があるとは言えない結果となった。このことから、前節で得られた「FIT 買取価格が高いほど sPR 直近値の変化率が大きい」という傾向は、特に低圧分割において統計的に有意に見られることがわかる。

低圧分割は本来適用される保安上の規制を回避する社会的不公平が懸念されていたが¹⁵⁾、本論文の分析結果から、特に低圧分割の発電所の中で FIT 買取価格が高い発電所ほど sPR の変化率が大きくなるという結果が得られ、その懸念が統計的に裏付けられる結果となった。

7. 結論

本論文では、小規模太陽光発電所を対象として、発電所から提供される発電電力量のデータのみから、近隣の気象

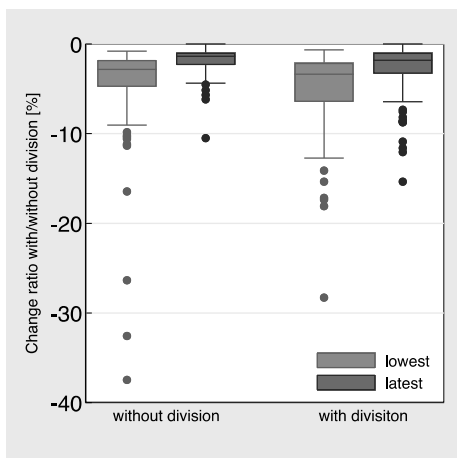


Fig. 12 Box-and-whisker plots of sPR change ratios with/without low-voltage division
 図 12 低圧分割がない場合とある場合の sPR 変化率の分布（箱ひげ図）

Table 6 Result of multiple regression analysis for a plant group with low-voltage division in case of change ratio of lowest sPR CR_{lo} as the explained variable

表 6 sPR 直近値の変化率 CR_{la} を被説明変数とした場合の低圧分割ありの発電所群の重回帰分析の結果

variables	CE	SE	t	P	95% CI	
FIT price: P_{fit}	-0.208	0.064	-3.23	0.002	-0.334	-0.081
capacity: $\log(C_{array})$	-0.364	0.380	-0.96	0.340	-1.117	0.388
latitude: L_{lat}	0.505	0.505	1.00	0.319	-0.493	1.504
longitude: L_{long}	-0.017	0.123	-0.13	0.893	-0.260	0.227
period: P_{mes}	0.605	0.317	1.91	0.059	-0.022	1.233
(constant)	-12.242	13.175	-0.93	0.355	-38.312	13.828

Table 7 Result of multiple regression analysis for a plant group without low-voltage division in case of change ratio of lowest sPR CR_{lo} as the explained variable

表 7 sPR 直近値の変化率 CR_{la} を被説明変数とした場合の低圧分割なしの発電所群の重回帰分析の結果

variables	CE	SE	t	P	95% CI	
FIT price: P_{fit}	-0.019	0.028	-0.66	0.510	-0.075	0.038
capacity: $\log(C_{array})$	0.066	0.176	0.37	0.711	-0.284	0.415
latitude: L_{lat}	-0.061	0.133	-0.46	0.646	-0.325	0.203
longitude: L_{long}	0.003	0.063	0.05	0.958	-0.122	0.129
period: P_{mes}	0.187	0.127	1.47	0.146	-0.066	0.440
(constant)	-0.620	6.204	-0.10	0.921	-12.926	11.686

観測地点のデータを用いて発電電力量の経年変化を推定・可視化する発電電力量監視サービスを開発し、その理論的手法を「簡易的なシステム出力係数(sPR)」として提案し、その手法を理論的に定義づけた。

また、sPR を用いて全国 272 ヶ所の小規模太陽光発電所の統計分析を行った結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 今回調査対象とした 272 発電所のうち約 4 割で -4%を下回る sPR の年変化率を経験している。
- (2) 直近値でみると-4%を下回る sPR の年変化率となっているのは、272 発電所のうち約 1 割となる。このことは、約 3 割の発電所が発電電力量の低下を一時的に経験した後、何らかの対策を行なって発電電力量を-4%を下回らないように回復させたことを意味している。
- (3) 年変化率-1%までは原理的に避けることができない経年変化であるが、その範囲内の良好な水準を保つ発電所は 272 発電所のうち約 27%あった。
- (4) 重回帰分析を行うための諸元が揃う 242 発電所のデータを統計分析したところ、FIT 買取価格と sPR 直近値の間に統計的に有意な相関関係が認められた。このことから、FIT 買取価格が高い発電所の所有者・運用者ほど適切な O&M を行なわず発電電力量をより低下させている傾向があると解釈できる。
- (5) 低圧分割されていない発電所群では FIT 買取価格 sPR 直近値の間に統計的に有意な相関関係が

認められなかった。一方、低圧分割された発電所群では FIT 買取価格と sPR 直近値の間に統計的に有意な相関関係が認められた。このことから、特に低圧分割され FIT 買取価格が高い発電所の所有者・運用者ほど適切な O&M を行なわず発電電力量をより低下させている傾向があると解釈できる。

なお、本論文の分析は、本発電電力量監視サービスに申し込んだ発電所のみでの分析であり、このサービスを申し込んだ時点で発電所の所有者・運用者は多少なりとも発電電力量の低下を意識し、適切な O&M を心がけようとする意思があるグループであると推測することができる。本論文冒頭で述べたとおり、2023 年度 3 月末日の段階で 73 万件を超える小規模太陽光発電所の所有者・運用者全てがこのような高い意識を持っているとは想定できず、仮に本サービス提供発電所以外の発電所群で同様の分析を行なった場合、sPR 直近値の変化率は更に悪くなることが予想できる。理想的には全ての小規模太陽光発電所にこのような監視を義務づけたり何らかの政策インセンティブを用いて推奨することが望ましい。本論文で提案した簡易推定手法である sPR を用いた監視サービスや発電阻害要因の推定手法が、できるだけ多くの小規模太陽光発電所の所有者・運用者に普及することが望まれる。

謝辞

本論文の成果は、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)の助成事業 (JPNP100324)の結果得られたものである。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁: 固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト, A 表 都道府県別認定・導入量(2023 年 3 月末時点) <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary> (2023 年 8 月 9 日更新)
- 2) 大関・井澤・山口・大谷・黒川: 太陽光発電システムの経年劣化特性, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2000)
T. Oozeki, T. Izawa, A. Yamaguchi, K. Otani, K. Kurokawa, Secular variation of Photovoltaic systems, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2000) (Nov. 2000), 53-56, Kanazawa, Japan
- 3) 井澤・大関・黒川・大谷・都筑: 太陽光発電システム計測データの品質診断法, 太陽/風力エネルギー講演論文集, p.455-458 (2001)
T. Izawa, T. Oozeki, K. Kurokawa, K. Otani, K. Tsuzuku, The Quality Check of Measured Data in Photovoltaic Systems, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2001) (Nov. 2001), 455-458, Tokushima, Japan
- 4) 大関・井澤他: システム出力電力量のみの計測における太陽光発電システム評価方法に関する研究, 電気学会論文誌 B, Vol.125, No.12, pp.1299-1307 (2005)
T. Ozeki, T. Izawa, K. Otani, K. Tsuzuku, H. Koike, K. Kurokawa, An Evaluation Method for PV Systems by using Limited Data Item, IEEJ Trans. PE, 125(12), 1299-1307 (2005)
- 5) 加藤和彦: 太陽光発電システムの不具合事例ファイル, 日刊工業新聞社 (2010)
- 6) 中本・江口: 不確実性を考慮した太陽光発電所の発電効率性分析, 環境経済・政策学会 2021 年大会 (2021)
Y. Nakamoto, S. Eguchi, Evaluating photovoltaic power plant performance considering uncertain parameters, 2021 Annual Conference of Society for Environmental Economics and Policy Studies (2021) online.
- 7) 新エネルギーO&M協議会: ウェブサイト
<https://pvom.jp/aboutom/>
- 8) エナジービジョン: ウェブサイト
<https://energyvision.tv/lp001/>
- 9) 大門敏男・奥山恭之・安田陽: 発電電力量と日射量データによる長期的傾向の解析に基づく発電阻害要因推定手法の開発, 日本太陽エネルギー学会講演論文集, No.84 (2022.11).
T. Daimon, Y. Okuyama, Y. Yasuda, Development of a hazard estimation method of photovoltaics based on long-term trend of generation and solar radiation data, Proceedings of JSES Conference (2022) (Nov. 2022), 289-292, Fukui, Japan
- 10) 奥山恭之・大門敏男・安田陽: 小規模太陽光発電所を対象とした発電電力量経年変化の傾向に基づく発電阻害要因の推定を活用した是正事例, 日本太陽エネルギー学会講演論文集, No.85 (2022.11).
Y. Okuyama, T. Daimon, Y. Yasuda. Case studies of hazard correction for small-scale solar power plants based on generation ageing trend and estimation of hazard factors, Proceedings of JSES Conference (2022) (Nov. 2022), 293-296, Fukui, Japan
- 11) 気象庁: 過去の気象データ・ダウンロード
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- 12) 日本産業規格 JIS C 8960:2012 「太陽光発電用語」
JIS C 8960:2012 “Glossary of terms for photovoltaic power generation”
- 13) Erbs, D.G.; Klein, S. A.: Duffie, J. A.: Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly Average Global Radiation, *Solar Energy*, 28(4), 293-302 (1982).
- 14) Perez, R.; Seals, R.; Ineichen, P.; Stewart, R.; Menicucci, D.: A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces, *Solar Energy*, 39(3), 221-231 (1987)
- 15) 経済産業省資源エネルギー庁: 発電設備の分割対策に関する Q&A (最終更新日: 2023 年 6 月 7 日)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/summary/regulations/02_faq/index.htm