

発電量の正規化に基づいた 太陽光発電システムの異常検知手法の提案と評価

秋山 陽平† 河西 勇二‡ 岩田 昌也‡ 高橋 栄一‡ 佐藤 文明† 村川 正宏†

太陽光発電システムの寿命は一般的に 20 年といわれているが、工業製品である以上一定の確率で故障が発生する。しかし、現状での太陽光発電システムでは、パネル単位での異常を検出することが難しい。そのため、パネルの異常を抱えたまま太陽光発電システムが運用され、期待する発電量に達しないケースが発生している。このため、太陽光発電システムの価格上昇や通信工事費用増加を招くことのない異常検出システムの研究開発が急務である。これまでに、産業技術総合研究所では直流電力線を利用した独自の電力線通信方式を用いて、クラウド上にデータを集積・蓄積させることでクラウドを用いた状態モニタリングを可能とした。我々はそのデータを基に発電量の移動平均を用いた異常検知手法を実装したが、異常の閾値が固定値であるために天候が安定しない場合に誤検知が生じやすいなど問題があった。そこで、本稿では積算発電割合の推移が正規分布に従う性質を用いて、過去データから正規分布の確率密度関数の下側確率を求め、その値に基づき異常検知を行う手法を提案する。評価では実際に 24 枚のパネルを用いて、ある 1 枚のパネルの全面・半面をそれぞれ遮光し異常検知できるか否か実験を行った。

1. はじめに

東日本大震災後、我が国では再生可能エネルギーの導入拡大が必須の情勢であり、特にメガソーラ等の太陽光発電への期待が高まっている[1]。太陽光発電システムの寿命は一般的に 20 年[2]といわれているが、工業製品である以上一定の確率で故障が発生し、その期間中に異常の発生を防ぐことは困難である。一般的に太陽光発電システムを設置した場合、メンテナンスされることは稀であり、仮に発電量の低下に気付いた場合でも、太陽光発電システムの特性上、影や日照条件の変化のためなのか、パネル等の異常なのか判別が困難である。そのため、パネルの異常を抱えたまま太陽光発電システムが運用され、期待する発電量に達しないケースが発生し、結果的に費用対効果の面から、太陽光発電システムの普及の妨げになりかねない。このため、太陽光発電システムの価格上昇や通信工事費用増加を招くことのない異常検知システムの研究開発が急務である[3][4][5][6]。

これまでに、産業技術総合研究所では直流電力線を利用した独自の電力線通信方式を用いて、発電情報のモニタリングを可能としている[7]。この手法は、安価なデータ通信装置子機をパネルの端子箱に実装することにより、発電状況を逐一観察可能であり、電力線通信を用いることで、新たな通信ケーブルなどを必要とせず、導入コストを抑えることを可能とした。更にデータ通信装置子機において計測された膨大な発電情報をネットワーク上の仮想データベースであるクラウドサーバ上に集約・蓄積させることを可能とした。そのデータを基に、ブラウザ上でパネル単位での発電状況などの逐一観測できる状態モニタリングを可能とし、収集した膨大な電流値データを利用して移動平均を用

いた異常検知を行う手法を実装した[8]。この異常検知手法は、発電時に生じる電流値に着目し、パネル毎の 1 日の一時間毎の電流値を積算し、パネル群全体からの積算値で規格化することで得られる積算発電割合を算出する。そこで算出された積算発電割合の過去 10 日分の移動平均に基づき異常検知を行っている。しかしながら、移動平均を用いた異常検知は、過去 10 日分のデータを用いるために異常検知後 10 日後には異常値を正常値と判定してしまう。また、異常判定を行う閾値が固定値であるために、天候が安定しない場合などの積算発電割合の散らばりが大きいときに正常値を異常値と判定するなどの誤検知が生じやすい。

そこで、本稿では積算発電割合の推移が正規分布に従う性質を用いて異常検知を行う手法を提案する。提案手法では、収集された電流値から積算発電割合を求め、過去の積算発電割合から正規分布の確率密度関数を生成、判定日の下側確率を算出し、その値に基づき異常検知を行うことで統計的に異常値か正常値かを判定する。また、異常検知がなされた場合、その日のデータを以降の確率密度関数の計算時に過去データとして用いないことで、異常値を正常値と判断する誤検知数を改善する。

本研究では実際にパネル 4 枚を直列に接続した 6 つのストリングを用いて、それぞれのストリングの発電時の電流値を用いて異常検知の実験を行った。また、1 つのストリングを擬似異常ストリングとし、そのストリングの全表面積の 25%・12.5%を遮光し評価実験を行った。

2. 太陽光発電システム

2.1 太陽光発電システムにおける異常検知

太陽光発電システムはクリーンな新エネルギーと注目されている。太陽光発電システム(以下、パネル)は、一般的に約 20 年の寿命[2]といわれているが、工業製品である以

† 東邦大学大学院理学研究科

‡ (独)産業技術総合研究所情報技術研究部門 (AIST)

上一定の確率で故障が発生し、その期間中に異常の発生を防ぐことが困難である。仮に、発電量の低下に気づけたとしても、それが故障なのか日照条件の変化なのか検知しづらい。この理由として、現状の太陽光発電システムはシステム全体の発電量の変化しか把握できないため、個々のパネルの故障による発電量の変化を検知しにくいことがある。本来、太陽電池パネル1枚に異常をきたせば、それにより発電量の変化が現れ、異常の特定が可能である。しかし、現状の太陽光発電システムは、パネルのすべてが、直流から交流に変換するためのパワーコンディショナに接続されており、すべてのパネルの発電量の合計値しか把握していない。そのため、現状では異常の特定は難しく、異常自体の認識も容易ではない。

現時点でのパネルの故障診断方法は、目視による検査、あるいは赤外線カメラを用いて表面温度の変化を検知する手法が一般的である。しかし、目視による検査は、外観で故障が識別できる場合のみ有効であり、赤外線カメラは、大きな温度変化が生じる故障の場合のみ有効である。逆にいえば、外観的な故障が小さく、温度変化の生じない故障の場合は見過ごされるケースが発生する。このため、現状の太陽光発電システムは故障検知に関しては不十分であるといえる。更に、パネルの特性として、日照による発電量の変化が著しく、故障があったとしても雨や曇りなどの天候不順や、日の当たりづらい設置環境である場合は、尚更に異常検知が難しくなる。このように、メンテナンスが不完全な状態で、太陽光発電システムを用いると、パネル異常により期待する発電量を得られず、結果的に費用対効果の面で普及の妨げになるといえる。この問題点を解決するため、本研究では、太陽光発電システムの異常を容易に検知可能なシステムの開発を目標としている。

2.2 太陽光発電システムの発電量のデータ特徴

太陽光発電システムでの発電量データの特徴として、太陽光の日射量により発電量が著しく影響されるため、天候や環境に強く左右される。そのため、天候面に関しては、雨や曇などにより、発電量の変化の差が大きくなる。更に、晴天の場合でも、雲の存在により、隣接するパネルであっても発電量の差が強く現れる。また、悪天候時など日射量が極めて小さい場合は、電力線通信に発電電力を用いる場合、発電されないことがある。このため、悪天候時にはパネル群の一部又は、全体の発電量が計測されない場合があり、異常検知に有益なデータが得られず、異常検知は不可能である。環境面に関しては、木々や電線、電柱などの影による影響が大きい。例えば季節により、夏と冬の太陽高度の違いや、時間による太陽高度の変化などで、影の位置が一様に定まらず、それぞれのパネルの設置位置により発電量の推移が一定ではない。以上の理由から、太陽光発電システムの特徴は、

- 隣接するパネルであっても同時刻の発電量が逐一異

なる。

- 悪天候時などの発電できないパネルがある場合は、異常検知が不可能である。
- 同じパネル、同じ日照条件であっても1年を通して発電量が変化する。

よって、一般的な異常検知手法では異常の検知が難しい。太陽光発電システムでの異常検知を行うためには、日々のパネル毎の発電量から特徴を見つけ、その変化により異常を検知する必要がある。

3. 従来研究

この章では、我々がこれまでに開発したクラウドを用いた太陽光発電システムのモニタリングシステムの構成と異常検知手法を述べる。

3.1 モニタリングシステム

図 3.1 にモニタリングシステムの構成図を示す。全体構成として、(1)発電モニタ通信装置子機(以下、子機)、(2)発電モニタ通信装置親機(以下、親機)、(3)クラウドサーバから構築される。

動作の流れは、パネルに配置された子機が電圧や電流などの発電データを収集し、そのデータを電力線通信を用いて親機に送信する。データを受信した親機は、複数台の子機からのデータを集約し1分間隔でクラウドサーバに送信する。クラウドサーバは受信したデータを収集し、データの可視化と異常検知を行う。図 3.2 にデータの可視化例を示す。詳細は文献[7][9]を参照。

3.2 これまでに実装した異常検知手法

文献[8]で提案した異常検知手法は主に2フェーズがある。

- 積算発電割合の算出

一定期間ごとの電流値を積算し、パネル群全体の積算値で割ることで得られる割合を算出する(以降、これを積算発電割合と呼ぶ)。積算発電割合を用いることで天候や季節による日射量の発電量の変化による影響を低減することが可能である。この理由として、以下の仮説に基づく、

- ✧ どのパネルも発電量は一定間隔の日射量に比例する。例えば、曇りの日は1時間毎の発電量の平均を見れば、どのパネルも同程度に雲に影響される。
- ✧ 短い期間において、固定された遮蔽物があれば、その影によって一定間隔に同じだけ発電量に影響を与える。これは、1週間などの期間で見れば、日々の木の影はほぼ同じ軌跡を辿り、日々の発電量が同じだけ低下する。

以下に、一つのストリング P_a の積算発電割合 $R(P_a)$ の算出方法を示す。一定の間隔を1日として、1年を

通じて日射量が高い9時から15時までの1時間毎の電流値 C_{Pa} の平均を用いる。1日のストリング P_a の積算値 $S(P_a)$ は、

$$S(P_a) = \sum_{t=9}^{15} C_{Pa}(t) \quad \dots (1)$$

よって、ストリング P_a の1日の積算発電割合 $R(P_a)$ は、

$$R(P_a) = \frac{S(P_a)}{\sum_{k=1}^n S(P_k)} \quad \dots (2)$$

である。

図 3.3 に積算発電割合の面グラフを示す。これはストリング 1(P_1)からストリング 6(P_6)の1日毎の積算発電割合 $R(P_1)$ から $R(P_6)$ までのグラフである。図中の点線は参考の為に、気象庁のホームページ[10]内にある、実験場所であるつくば市の日々の日射量の推移をプロットした。面グラフの推移は日射量(点線)の低下が激しいときを除いては、それぞれの積算発電割合の変動が小さいことから、積算発電割合を用いることで影などの環境からの影響を受けづらいことが分かる。日射量が小さい場合に変動が大きい理由として、ストリング毎の環境による発電量の変化が大きいことが推察される。更に、本実験環境(5.1節参照)では6つのストリングにより実験を行っているため、全ストリングが同じ環境であれば積算発電割合は平均して約16.7%の値を取るが、実際にはストリング毎の設置環境により日光の当たり方が異なるため、ストリングにより日々の平均積算発電割合は異なる。

● 移動平均を用いた異常検知手法

異常検知は、算出したストリング P_a の積算発電割合 $R(P_a)$ と、前日から一定期間の遡った過去 n 日分の平均との過去の積算発電割合 $r_n(P_a)$ とを比較し、その変動量 $M(P_a)$ に応じて異常検知を行う。過去平均割合 $r(P_a)$ を計測日 t 日の前日 $t-1$ 日から n 日間遡った日数とし、 $r_n(P_a)$ と表記する。ここで $n=10$ とした場合、 $r_{10}(P_a)$ は、

$$r_{10}(P_a) = \frac{\sum_{k=t-11}^{t-1} R_k(P_a)}{10} \quad \dots (3)$$

変動量 M は、

$$M(P_a) = \frac{R(P_a)}{r_{10}(P_a)} \quad \dots (4)$$

となる。この変動量が90%以下になった場合に異常と検知した。移動平均を用いた異常検知手法は、過去との比較であるため大きな発電量低下の際には威力を発揮する反面、汚れの付着などの小さな発電量の低下の場合や天気の良い日が続いた場合などに異常と検知されづらい。更に、過去10日分の移動平均を用いているため、例外的に日射量が高い日が続いた後に、正常値を異常と誤検知する可能性が高い。また、異常

が発見された後に放置された場合に10日間かけて徐々に正常値に近づき、最終的に正常値として判別されてしまう。

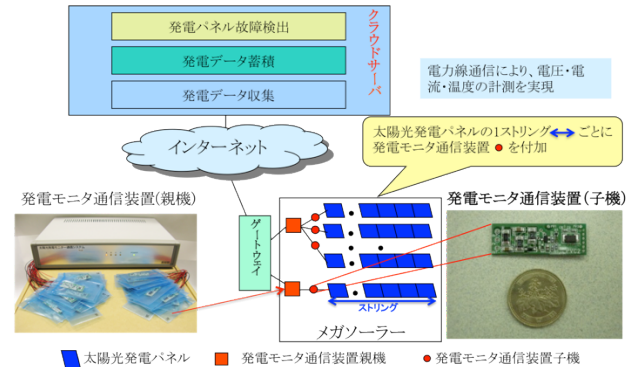


図 3.1 モニタリングシステムの構成図

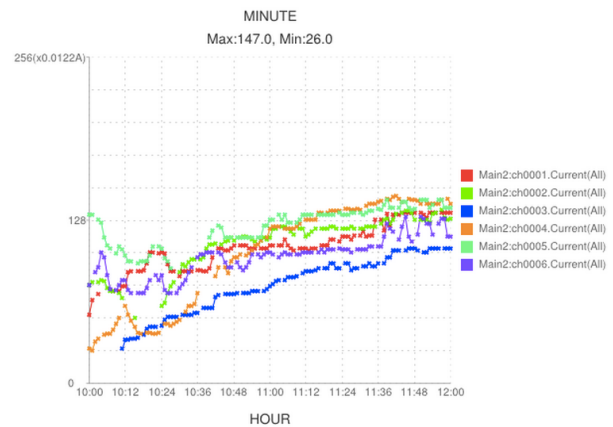


図 3.2 発電量のグラフ例

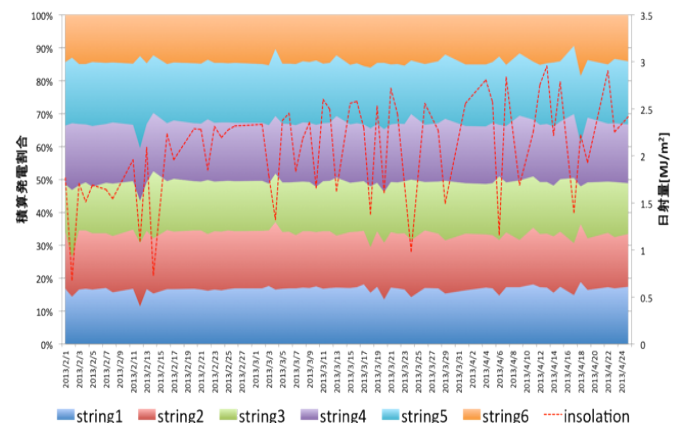


図 3.3 積算発電割合の面グラフ

4. 提案手法

本提案手法は、過去 n 日分の積算発電割合 $r_n(P_a)$ から確率密度関数を生成、判定日の下側確率を算出し、その値に基づき異常検知を行う手法である。図 4.1 に提案した異常

検知手法の流れ図を示し、以下に異常検知手法の詳細を述べる。提案手法は主に、クラウドアプリケーション(以降、アプリケーション)として定期的に行う。アプリケーションはクラウド上のデータベースに収集された発電量のデータを1日毎に集計し、積算発電割合を算出、過去データとして蓄積させる。過去データが指定した n 日分蓄積された後に、異常検知を行う。異常検知は、過去データから正規分布に基づく確率密度関数の生成、生成された確率密度関数から判定日の下側確率を算出し、算出値に基づき異常検知を行う。また、異常を検知した場合にはその日の積算発電割合を以降の確率密度関数の計算時に過去データとして用いない。これは異常値を正常値と判断する誤検知数を改善するためである(3.2節参照)。

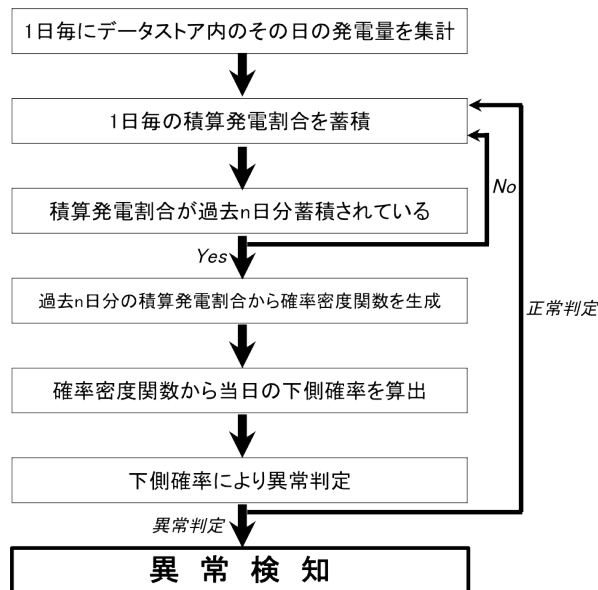


図 4.1 異常検知手法の流れ図

4.1 積算発電割合の正規性

積算発電割合のデータ特徴は主に2つあり、1つ目の特徴はストリング毎の1日の発電量の積算値を全体の積算値で割ることによって得られる割合を用いることで、天候や環境による発電量の変動を低減できるため日々の割合の変動が小さい。そのため、異常時に正常時との差異が大きく現れる。

2つ目の特徴として、図 4.2 に積算発電割合の正規性のグラフを示す。図中(a)ヒストグラムと図中(b)正規確率プロットに示されるように積算発電割合は正常時には正規分布に従うと考えられる。それぞれ、ある一つのストリングの2013年2月1日から8月19日までの図であり、(a)ヒストグラムは縦軸を度数・横軸を積算発電割合で表したヒストグラムであり正規分布の様相を呈している。(b)正規確率プロット(正規 Q-Q プロット)は横軸が標準化したデータ、縦軸が期待値であり、点がほぼ直線上に並んでいることが分かる。ここで、正規確率プロットとはデータの分布が正規分布を示しているかどうかを視覚的に判断するための散

布図であり、点がほぼ直線上に並んでいれば正規分布に従っていると考えられる。更に、正規性の検定で用いられるコルモゴロフ・スミルノフ検定(Kolmogorov-Smirnov test)[11]を擬似異常パネルを設置していない全ストリングに対して2013年5月27日から7月9日の期間で行った結果、 p 値(有意確率)の平均が0.4398であり正規性が示された。

このため、本稿では積算発電割合が正規分布に従うことを仮定し、正規分布の確率密度関数からの下側確率を基に異常検知を行う。

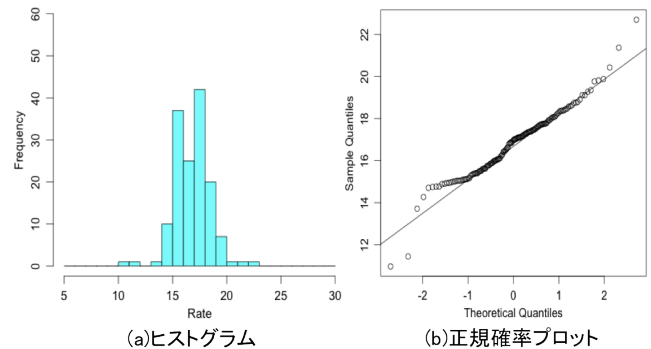


図 4.2 積算発電割合の正規性のグラフ

4.2 正規分布に基づいた下側確率の算出方法

ストリング毎の日々の積算発電量が過去 n 日蓄積した後、正規分布の確率密度関数を求める。ここで、正規分布とは平均 μ 、分散 σ^2 とするとき、確率密度関数 $f(x)$ は以下のように定義される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \cdots (3)$$

次に、確率変数 $z = (x - \mu)^2 / \sigma$ とすると標準正規分布の下側確率 $\Phi(z)$ は、

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \cdots (4)$$

である。下側確率を求めることで、判定日が正規分布の期待値からどれだけ外れているかを統計的に判定することが出来る。

4.3 異常判定の閾値

判定日の積算発電割合を算出し、過去 n 日分の確率密度関数を生成後、異常判定を行う。データが正規分布に従う異常検知を行う手法にシグマ法[12](以下、 σ 法)がある。

図 4.3 に σ 法を用いた管理図を示す。 σ 法とは主に工業製品の製造工程でばらつきの判定に使われ、製品やデータの変動の原因が偶然か異常かを判定するための管理限界線(異常とする閾値)を設定する方法である。平均値 μ と標準偏差 σ とするとき、それぞれは以下のように定義される。

- 1 σ 法: $\pm 1\sigma = \mu \pm \sigma$
- 2 σ 法: $\pm 2\sigma = \mu \pm 2\sigma$
- 3 σ 法: $\pm 3\sigma = \mu \pm 3\sigma$

ここで、図 4.3 にシグマ法を用いた管理図より、図中の縦軸が確率密度、横軸が標準化した積算発電割合であり、 -1σ から $+1\sigma$ の間の確率密度は約 68.3%、 -2σ から $+2\sigma$ は約 96%、 -3σ から $+3\sigma$ は約 99.6%である。そのため、 -1σ から $+1\sigma$ を例とすると判定日の標準化された積算発電割合は約 69%の確率で -1σ から $+1\sigma$ 間に含まれ正常値と判断され、約 31%の確率で異常値と判断される。本提案手法では下側確率のみに着目するため、この例では下側確率が標準化された積算発電割合が約 15.5%未満の場合に異常値として検知される。

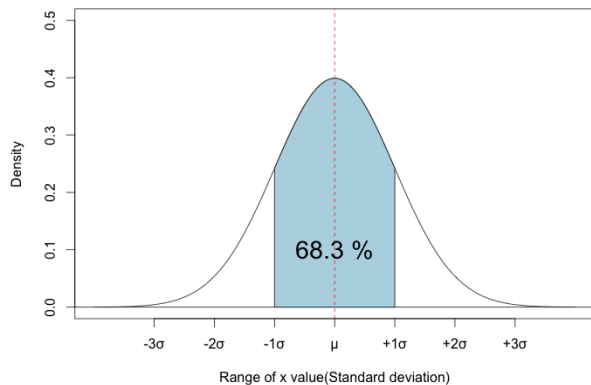


図 4.3 σ 法を用いた管理図

4.4 異常判定後の処理

σ 法により判定後は、以下の 3 つの処理に分かれる。

- ① 下側確率が閾値未満の場合
異常と判定し、以降の確率密度関数の計算時に過去データとして用いない。これは異常値が連続して出現した場合、積算発電割合の平均値が徐々に小さくなり本来は異常値である値が正常値として判定されることを防ぐためである。
- ② 上側確率が閾値未満の場合
正常と判定し、以降の確率密度関数の計算時に過去データとして用いない。これは例外的な高い積算発電割合が過去データに含まれることで、過去データの平均値が高くなるために本来は正常値である値が異常値として判定されることを防ぐためである。
- ③ 下側確率・上側確率が共に閾値以上の場合
正常値と判定し、過去データとして用いる。

5. 評価実験

実験は、2013 年 2 月 1 日から同年 8 月 19 日までの期間において異常検知を行った。また、その期間に 2 パターンの疑似異常パネルを設置した。本稿では、本提案手法と従来手法である移動平均を用いた手法の二つの手法から疑似異常パネルを検知し比較を行う。

5.1 実験環境

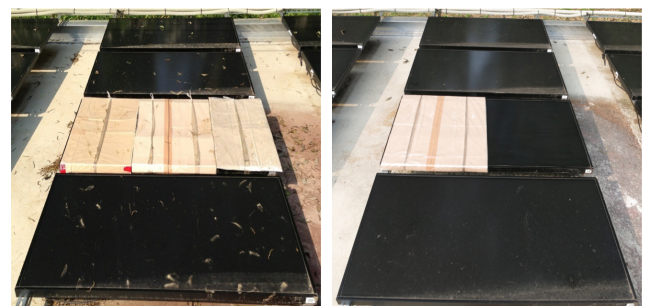
図 5.1 に実験を行ったパネル設置環境を示す。パネルはソーラーフロンティア社製 24 枚のパネルを用いる。本稿では、縦列のパネル 4 枚を 1 スtring とし、6 つの String に関して実験を行った。また、String はそれぞれ、図中の右から String 1、String 2 とし、一番左が String 6 となる。また、本実験環境は図に示すように、パネル上方に電線があり、周囲には電柱・林が存在する。このため、異常検知環境としては一般的なパネル設置環境と比較すると過酷な環境といえる。

5.2 疑似異常パネルの実験環境

図 5.2 に 2 パターンの疑似異常パネルの実験環境を示す。図中(a)(b)のように疑似的に異常パネルを設置した。(a)が 1 String にあるパネル 4 枚の総面積のうち 25%が遮光された状態であり、(b)が 1 String にあるパネル 4 枚の総面積のうち 12.5%が遮光された状態である。疑似異常パネル設置期間として、(a)25%遮光が 2013 年 4 月 26 日から 5 月 25 日、(b)12.5%遮光が 2013 年 7 月 10 日から 8 月 9 日である。



図 5.1 実験環境



(a)1Stringの25%を遮光した状態 (b)1Stringの12.5%を遮光した状態

図 5.2 疑似異常パネル

5.3 提案した異常検知手法の閾値の評価

本提案手法を用いて、過去 n 日分の n をそれぞれ 10 日、20 日、30 日とし、閾値を 1σ 、 2σ 、 3σ とした計 9 パターンにより評価を行った。評価方法として、それぞれのパターンの全 String の真陽性・偽陽性・真偽性・偽陰性

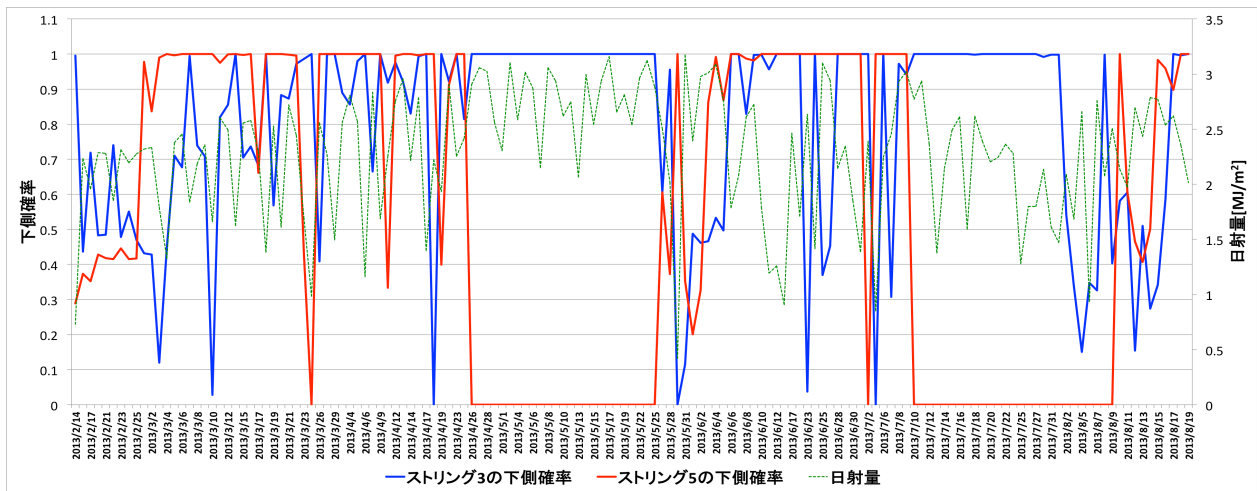


図 5.3 提案手法での下側確率のグラフ

を求め一致率により評価する。過去データの長さを n 、下側確率の閾値 σ とした場合の一致率 $P(n, \sigma)$ を以下に定義する。

$$P(n, \sigma) = \frac{\text{真陽性数} + \text{真陰性数}}{\text{真陽性数} + \text{偽陽性数} + \text{真陰性数} + \text{偽陰性数}}$$

ここで定義する一致率は、本提案手法での判定と実際の状態が一致した割合である。表 5.1 に横列が過去 n 日分の日数、縦列が閾値として一致率の表を示す。全ての過去 n 日分の日数において、下側確率の閾値が 3σ の場合が最も一致率が高いことが分かるこれは、閾値が 1σ など大きな値ほど、天候の変動が大きい場合に正常値が異常値と判定され、偽陽性が大きくなることが原因である。また、過去データ数として下側確率を 3σ にした場合にはどの過去データ数でも遜色のない結果を得られている。これは真陽性率が同等であるが、偽陽性率がそれぞれ異なるために僅かな差異が生じている。偽陽性率が異なる理由として、日射量が低い場合に積算発電割合にストリングの設置環境毎のむらが出やすいためである。以上により、本稿では下側確率の閾値を 3σ とする。例として、表 5.2 に過去 n 日分の日数を $n=10$ 、閾値を 3σ とした四分割表を示す。

また、本稿では早期の異常検知を想定しているため、過去データ日数を 10 日とし以降の評価を行う。

表 5.1 一致率

過去の日数 閾値	10日	20日	30日
1σ	0.9206	0.9111	0.9278
2σ	0.9421	0.9403	0.9422
3σ	0.9489	0.9562	0.9593

表 5.2 過去の日数を $n=10$ 、閾値を 3σ とした分割表

$n=10, 3\sigma$		状態	
検知	異常	真陽性数:52	偽陽性数:45
	正常	偽陰性数:0	真陰性数:785

5.4 本提案手法での結果

図 5.3 に提案手法での下側確率の推移グラフを示す。図 5.3 は例としてストリング 3(正常)とストリング 5(擬似異常あり)の下側確率と参考のために気象庁発表の実験場所のあるつくば市の日々の日射量の平均値を点線としてプロットした。横軸がデータ収集日、左縦軸が下側確率、右縦軸が 1 日の 9 時から 15 時までの日射量の平均値である。

図 5.3 から擬似異常ストリングであるストリング 5(青線)が、ストリングの 25%を遮光した 2013 年 4 月 26 日から 5 月 25 日、12.5%を遮光した 7 月 10 日から 8 月 9 日の双方で下側確率がほぼ 0 を示しており、正しく擬似異常を検知していることが分かった。次に、正常ストリングであるストリング 3、擬似異常ストリングであるストリング 5 の双方が、遮光していない期間に下側確率が 0 かそれに近い値を示している箇所があるが、それらの日は往々にして日射量が低い。これは日射量が低い場合、光が当たりやすいストリングと当たりづらいストリングが存在するためにストリング毎の積算発電割合に差が生じ、結果的に下側確率が小さい値を取るためである。また、日射量が高く下側確率が低い場合は、午前の日射量が低く、午後の高いとき、またはその逆のときに生じた。なお、2013 年 2 月 13 日以前は過去データ日数の 10 日間分が揃わないため、データが存在しない。2 月 14 日から 2 月 24 日までは異常検知後の処理(4.4 節参照)を行わずに過去データとした値が含まれているため下側確率の推移の変動が大きくなっている。

5.5 擬似異常ストリングの提案手法と従来手法の比較

図 5.4 に擬似異常ストリングであるストリング 5 のみの提案手法(青線)と従来手法(黒線)との ROC 曲線を示す。ここで、ROC 曲線[13]とは縦軸に真陽性率(True Positive Rate)、横軸に疑陽性率(False Positive Rate)を示している。図中のグラフは提案手法と従来手法の 2013 年 2 月 14 日から 8 月 19 日までのデータにおいて、閾値を 0.0 から 1.0

まで変化させた場合の真陽性率と偽陽性率の軌跡である。軌跡が左上にあれば良い性能を示しているといえる。また、認識率とは、AUC(ROC 曲線下面積)のことであり、この値は1(100%)から0.5(50%)までの値をとる。異常検知手法が正確に判定できている場合は1となり、全く正確な判定ができていない場合は0.5をとる。図中のROC 曲線より、提案手法では偽陽性率が1.05%のときの真陽性率は100.00%であり、認識率は99.47%である。従来手法では偽陽性率が11.58%のときの真陽性率は48.08%であり、認識率は68.00%である。このため、本提案手法により従来手法より認識率が31.47%向上した。この大きな要因として、図中の提案手法と従来手法の四分分割表から、従来手法では異常検知後の10日後に異常値が正常値と判断されるため提案手法と比較して偽陰性が27回と異常値を正常値と判定している。本提案手法では異常と判定した後、以降の確率密度関数の計算時に過去データを用いないため、偽陰性が27回から0回に改善されている。また、従来手法では異常値の閾値が固定値であるために変動が大きく偽陽性が11回と正常値を異常値と判定している。

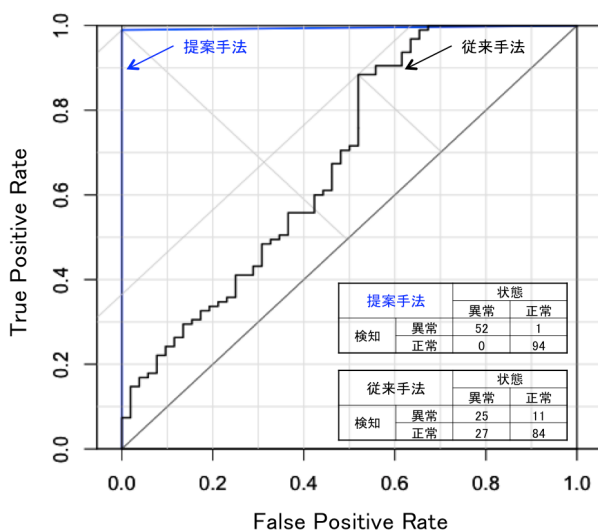


図 5.4 提案手法と従来手法との ROC 曲線

5.6 全ストリングの提案手法と従来手法の比較

図 5.5 にストリング 1 から 6 の全ストリングによる提案手法(青線)と従来手法(黒線)の ROC 曲線を示す。これは図 5.4 のストリング 5 単体での ROC 曲線ではなく、図 5.5 は全てのストリングに対し提案手法と従来手法での ROC 曲線を示している。図中の ROC 曲線より、提案手法では偽陽性率が 3.13%のときの真陽性率は 100.00%であり、認識率は 98.43%である。従来手法では偽陽性率が 12.65%のときの真陽性率は 48.08%であり、認識率は 64.89%である。このため、5 つの正常ストリングを含んだシステム全体に対して、本提案手法により認識率が 33.54%向上した。よって、全ストリングに対しても 5.5 節のストリング 5 のみ

と同様に提案手法を用いることで従来手法と比較して大幅に性能が向上した。

図 5.4 と図 5.5 のまとめとして、提案手法を用いることで一つのストリングの 25%・12.5%を遮光したいずれの疑似異常においても、異常検知が高い精度で達成されている。また、従来手法と比較しても提案手法では疑似異常ストリングに関しては認識率が 31.47%向上、全ストリングに関しては 33.54%向上と大幅に改善されていることが分かる。これらの結果から、本提案手法は太陽光発電システムの異常ストリング検知手法において有効であるといえる。

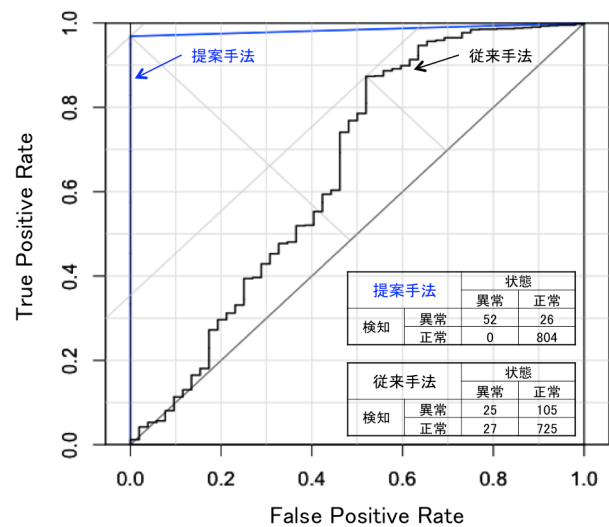


図 5.5 全ストリングの提案手法と従来手法の ROC 曲線

6. おわりに

本稿では、太陽光発電システムの異常ストリング検知において、積算発電割合が正規分布に従うことに着目し、過去の積算発電割合のデータを用いて下側確率を求め σ 法により判定することで早期の異常検知手法の提案をした。提案手法の有効性検証のため、実際に設置された計 24 枚 6 ストリングの太陽光発電パネルを用いて、1 つのストリングの 25%・12.5%を遮光し異常実験を行い提案手法と従来手法の比較を行った。その結果、提案手法を用いることにより、25%・12.5%の遮光においても異常検知の真陽性率が大幅に向上し、認識率が 64.89%から 98.43%と大幅に改善された。

最後に今後の課題を述べる。今回の実験ではストリング毎の積算発電割合の算出に 9 時から 15 時の平均電流量を用いており、1 日の天候の推移による日射の影響を加味していない。そのため、日射量が低い場合や 1 日の天候が安定しない場合にストリング毎の積算発電割合に大きな差異が生じ、結果として過検知が発生した。このため、積算発電割合の算出方法を考慮する必要がある。また、本実験環境は 1 ストリングあたりのパネル数が 4 枚であり、1 スト

リングあたりのパネル数が増加した場合にどこまで積算発電割合が有効に作用するかが未検討であるため、1 ストリングあたりの枚数による異常時の積算発電割合の変化を調査する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、JST 復興促進プログラム（マッチング促進）により実施された。

参考文献

- [1]資源エネルギー庁，源電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法(平成二十三年法律第百八号)，十三経済産業省：
<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/2011kaitori.pdf>
- [2]太陽光発電協会(編)，太陽光発電システム手引書，pp.1-13 耐用年数と補修，太陽光発電協会
- [3] 加藤和彦，「太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価（1）－故障診断手法の確立に向けて－」，太陽エネルギー，Vol. 33, No. 4, pp. 69-74(2007)
- [4] 佐藤誠，野田悦夫，若松建吾，朴英，「太陽電池モジュールの異常監視・診断システム」，東芝レビュー67(1)，pp.18-21(2012)
- [5] 植田譲，「太陽光発電システムのモニタリングと故障診断」，太陽エネルギー38(1)，pp.27-32，日本太陽エネルギー学会(2012)
- [6] 高島工，「太陽電池ストリング故障診断のための信号応答分析」，太陽/風力エネルギー講演論文集，pp.461-464 (2012)
- [7]野里裕高，河西勇二，岩田昌也，高橋栄一，村川正宏，「電力線通信による太陽電池パネル毎のモニタリングシステムの開発」，電子情報通信学会和文論文D編，Vol. J96-D, No.3(2013)
- [8] 秋山陽平，河西 勇二，岩田 昌也，高橋 栄一，佐藤文明，村川正宏「太陽光電池パネルのクラウドを利用した異常検知システムの開発」，DICOMO2013 論文集，pp.945-952(2013)
- [9]高野了成，清水敏行，中田秀基，工藤知宏，「クラウドを利用した電力可視化システムの構築」，情報処理学会研究報告 Vol.2011-OS-119, No.5, pp.1-8(2011)
- [10]気象庁:<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- [11] Chakravarti, Laha, and Roy, Handbook of Methods of Applied Statistics, Volume I, John Wiley and Sons, pp. 392-394 (1967)
- [12] 楠川恵津子，太田宏，「pn 管理図および p 管理図の改良」，日本経営工学会論文誌 50(3)，pp.139-148(1999)
- [13] 白石順二，「ROC 解析，医用画像情報学，桂川茂彦編」，南山堂，pp.111-130(2002)