

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13401
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2022
課題番号：19K04358
研究課題名（和文）両面受光型太陽電池の垂直設置時の経済性・環境性評価手法の開発と適地地図の作成

研究課題名（英文）Economic and Environmental Evaluation Method and Suitable Location Map for the Bifacial Photovoltaic Modules

研究代表者
伊藤 雅一（Ito, Masakazu）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：80444115
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：太陽電池に積もる砂・雪への対応や、土地の有効利用の観点から、垂直設置された両面受光型太陽電池（垂直設置型両面PV）の利用の検討が行われている。本研究では、垂直設置により影の影響など複雑化する発電量の推定方法として（1）視野度推定手法（ビューファクター）に関する研究と、（2）影を考慮した地面反射成分の推定精度向上のための研究開発を行い、（3）ライフサイクルアセスメント（LCA）と地理情報システム（GIS）を組合せ、垂直設置型両面PVの経済性・環境性が分かる適地地図の作成を行い、乾燥地での利用価値を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の太陽電池の入射光に関する研究が傾斜設置されたメガソーラ等に関する研究に対し、近年急速に普及が進む両面受光型太陽電池（両面PV）は裏面からも受光するため、裏面への入射光の推定モデルが求められている。特に、前後のモジュールによって散乱日射量が遮られる点や、地面反射成分の自己影による減少は通常の設定方法では影響が少ないためほとんど研究されてこなかった。本研究で開発した視野度推定手法や角度表現モデルにより既存の手法より高精度で発電量を推定できることから、PV事業者の事業性把握や、電力システムの安定した運営に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Vertically installed bifacial photovoltaic system (VBi-PV) is attracted, because it can reduce sand and snow accumulation on the PV surface, and effective land utilization. This study proposed three methods. They are (1) View factor model, (2) Land reflection model considering shadow on the ground, and (3) Suitable world map by Life-Cycle Assessment and GIS. By using these method, effectiveness of the VBi-PV was verified.

研究分野：太陽光発電システム，電力ネットワーク，ライフサイクルアセスメント，GIS

キーワード：両面受光型太陽電池 垂直設置 ライフサイクルアセスメント GIS 砂漠

1. 研究開始当初の背景

大幅な温暖化ガス削減とエネルギー枯渇問題への対応のため、広大で日射量の多い砂漠と、太陽光発電の組み合わせ「砂漠太陽光発電」に着目した。砂漠と言うと美しい砂丘に代表されるが、実際には岩砂漠、礫砂漠、土漠など様々である。特に、砂利や土などで構成される礫砂漠は地盤が固く平坦である。また、砂漠は晴天率が高いため日射量が多く、サハラ砂漠は東京の2倍以上ある。さらに、砂漠と電力系統図を同じ地図上に重ねれば、砂漠と送電線が重なる部分もある。つまり、太陽光発電に適した砂漠は、非常に遠い場所ではなく、需要地の近くにもあると言える。

一方で、砂漠地域では礫砂漠と言っても砂の問題が依然として残っている。近年の太陽電池モジュールの価格低下から両面受光型太陽電池モジュールが注目されつつあり、特に中東地域での利用が検討されているが、環境への影響は明らかにされていない。また、新しい両面受光型太陽電池モジュールの発電量推定モデルの開発の必要がある。

2. 研究の目的

太陽電池に積層する乾燥地の砂への対応として、垂直設置された両面受光型太陽電池（垂直設置型両面 PV）の利用に関する研究がされているが、多くは発電量のみでの研究である。太陽電池は、地球温暖化やエネルギー枯渇問題への解決策として普及が進められており、環境性を含めた評価なしでは環境に良いとは明言できない。本研究では、ライフサイクルアセスメント（LCA）と地理情報システム（GIS）を組合せ、複雑な計算が必要となる垂直設置型両面 PV の経済性・環境性が簡単に分かる適地地図の作成を行い、乾燥地での利用価値を明らかにし、普及を促進する。この時、地面反射成分の推定が重要となる。開発予定の太陽電池の自己影を考慮する視野度推定手法は影の地面反射成分を発電量に換算する。通常の片面 PV を用いたメガソーラではあまり影響はないため研究例は少ないが、両面 PV を用いた場合の影響は大きい。また、太陽電池モジュールが次の列の太陽電池モジュールに影を作ったときの、太陽電池モジュールのセル配列を考慮した離隔距離最適化手法の開発を進め、より精度の高い推定手法を開発して地図へ反映し、太陽光発電システムの利用の促進を目指す。

3. 研究の方法

研究は主に、垂直設置型両面 PV 向けの発電量推定のため、(1) 視野度推定手法（ビューファクター）に関する研究と、(2) 影を考慮した地面反射成分の推定精度向上のための研究、(3) LCA の3つを実施した。

(1) 視野度推定手法

ビューファクター（VF）は、右図に示すような前列もしくは後列のモジュールに隠されていない、空がどれだけ見えるかの割合である。VF は、まず、検討するモジュールの中心を基準として球を考え、前列左側のモジュールで遮られている地面反射成分、天空散乱成分を考える。これを用いることで、最適な前後のモジュールとの離隔距離を算出することも可能である。また、モジュールは太陽電池セルが直列に接続されたクラスタが2つ、または、3つで構成されているが、セルが直列に接続されているため影が一部にでもかかると出力が大幅に減少する。本手法ではこれにも着目し、より現実に近い発電量を算出できるような手法とした。

具体的には、図2に示すフローとなる。最初に、設置方法の方位角と傾斜角を決める。その後、手順1として日射量の算出を行う。日射量の直達成分は直達法、地面反射成分は均一反射モデル、天空散乱成分は Perez モデルを用いて日射量を求める。手順2として、前列もしくは後列のモジュールに隠されていない、空がどれだけ見えるかの割合であるビューファクター（VF）の計算をする。VF は、まず検討するモジュールの中心を基準として球を考える。前列左側のモジュールで遮られている地面反射成分を考える

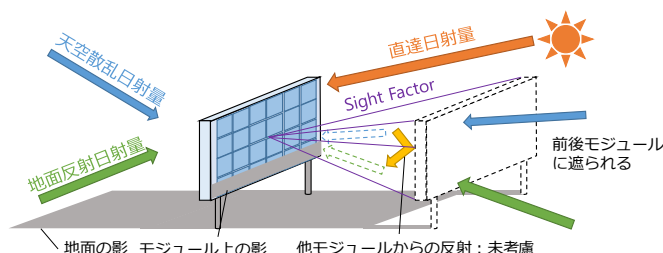


図1 視野度推定手法の概要

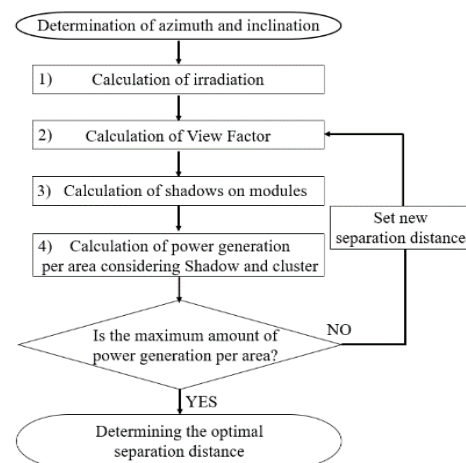


図2 離隔距離最適化手法のフロー

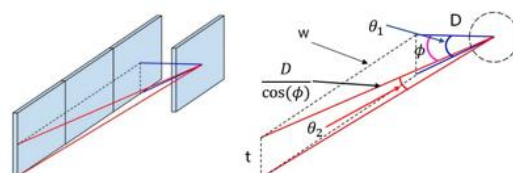


図3 VFの計算方法

場合、図3のように、モジュールで遮られている角度を、横方向を ϕ 、正面と端の高さ方向を θ_1 、 θ_2 とする。すると、前列左側のモジュールに遮られている球の表面積は式(1)となる。

$$S = \int_0^\phi \arctan\left(\frac{t}{D} \cos \psi\right) d\psi \quad (1)$$

ここで、 t はモジュールの半分の高さ、 D は離隔距離、 ψ は横方向の角度である。球の表面積を用いてモジュールに遮られていない割合であるVFは、モジュールの傾斜角 β [°]を用いて式(2)で求める。

$$VF_{ground} = \left\{ \left(\frac{4\pi}{2} \right) \times \beta \times \left(\frac{2\pi}{360} \right) \right\} - S \quad (2)$$

同様にして右側や裏面、天空散乱成分のVFを計算する。VFを用いることによりモジュール配置を考慮した実際にモジュールに入射する日射量の地面反射成分と天空散乱成分の算出を行う。手順3としてモジュールにかかる影の長さ高さを求める。手順4としてクラスタを考慮した設置面積あたりの発電量を算出し、その後、設置面積あたりの発電量が最大となる離隔距離を求めるため、手順2から手順4まで繰り返し、最適離隔距離を決める。

(2) 影を考慮した地面反射成分の推定手法

従来の地面反射推定モデルが影の影響を考慮していないため、これを考慮するための手法の検討を行った。従来の片面受光型PVは20度や30度の傾斜で上方を向いているため地面反射成分による発電量はごくわずかであるが、両面PVの一方の面は地面の方向を向いているため、地面反射成分の影響が大きい。また、従来の地面反射成分推定モデルである均一反射モデルは影を考慮していないモデルであり、新しい手法が必要である。本研究では影を考慮した角度表現モデルを開発し、さらに、図4に示すような建物や前後のモジュールなどで減少する散乱成分を考慮するため、天空率(スカイビューファクター: SVF)を導入したモデルの開発を行った。

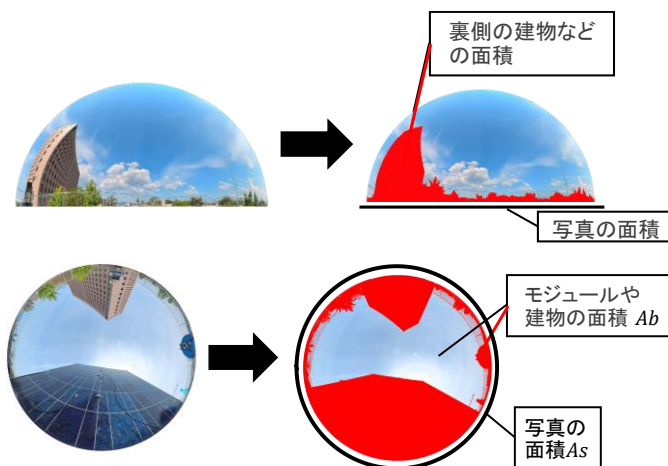


図4 散乱成分の天空率(上)と地面反射成分への散乱成分の天空率(下)のイメージ(赤が減少分)

角度表現モデルは次のようになる。

日なたでは、直達光と天空散乱光が地面で反射しているが、日影では、モジュールによって直達光が届かないため天空散乱光のみが反射される。角度表現モデルでは、図5に示すようにモジュールの影を2つの角度 θ_{width} [°]と θ_{depth} [°]を用いて表すことで、モジュールの中心から見える影が地面に占める割合 S_{rates} を(3)式で算出する。さらに、角度表現モデルの地面反射成分を(4)式で算出する。

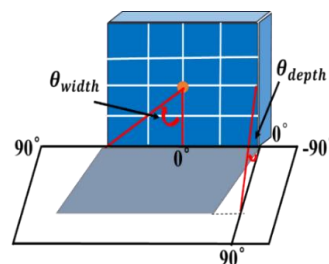


図5 天空率推定方法の概要

$$S_{rates} = \frac{2\theta_{width}\theta_{depth}}{180 \times 90} \quad (3)$$

$$I_{r\beta\gamma}^{AF} = (GHI - I_b S_{rate}) \rho \frac{1 - \cos(180 - \beta)}{2} \quad (4)$$

ここで、 $I_{r\beta\gamma}^{AF}$ [W/m²]は角度表現モデルでの地面反射成分、 I_b [W/m²]は直達日射強度DNIを水平面での日射強度に換算したもの、 GHI [W/m²]は水平面全天日射量を表し、第一項の均一反射モデルから、第二項の S_{rate} によって算出した影によって減少する日射強度を差し引くことで地面反射成分を算出している。

(3) ライフサイクルアセスメント (LCA) による評価

PVを構築・運用・廃棄するためには、エネルギーが必要となりCO₂が排出される。その投入量および排出量は、発電により回収できたエネルギーの量、および排出抑制できたCO₂の量によって取り戻すことができる。しかし、回収にかかった年数がPVの寿命よりも十分に短くなければ、環境に配慮した技術であるとは言えない。特に、

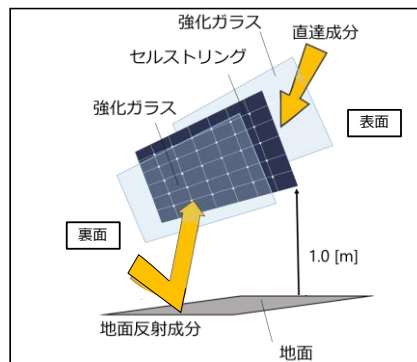


図6 両面PVのイメージ

両面 PV では裏面で発電するため、
 架台や影の影響など環境性において
 不明な点が多く、検討している研究
 は少ない。ここでは図 6 に示すよ
 うな両面 PV の環境性について、図
 7 のようなメガソーラを想定した。

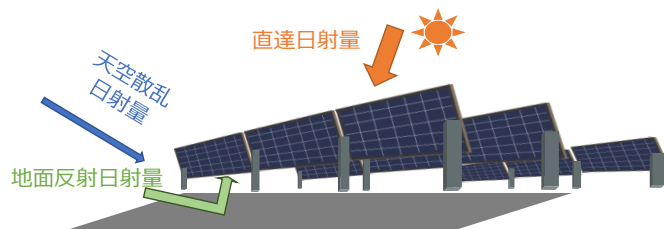


図 7 メガソーラのイメージ

基礎や架台については風速や地震
 を考慮した強度設計を行い、ケー
 ブルや上述の離隔距離最適設計を行
 った。また、発電容量は約 40~50 MW
 を想定し、システム境界はメガソーラ
 の構築・運用・廃棄までの LCA を行
 う。上述の最適離隔距離も考慮した。
 評価指標は CO2 排出原単位とエネル
 ギーペイバックタイム (EPBT) を、式
 (5) と式 (6) を用いて算出した。LCA
 データはサステナブル経営推進機
 構による MiLCA や文献から収集した。

CO₂排出原単位 [g-CO₂/kWh]

$$= \frac{\text{ライフサイクルの間に排出されるCO}_2\text{の合計値 [g-CO}_2\text{]}}{\text{年間発電量 [kWh/year]} \times \text{稼働年数 [year]}} \quad (5)$$

$$\text{EPBT [year]} = \frac{\text{ライフサイクルの間に投入されたエネルギーの合計 [MJ]}}{\text{システムの年間発電量 [MJ/year]}} \quad (6)$$

4. 研究成果

(1) 視野度推定手法

図 8 は福井市を想定し、モジュール間の離
 隔距離を 0.01[m] から 2.00[m] まで 0.01[m] ごと
 に変化させたときの設置面積あたりの年間
 発電量である。(a) は VF を考慮した場合、(b)
 は VF 未考慮の場合である。両面受光型太陽電
 池の容量は表面の容量を用いた。離隔距離を
 小さくすると、設置面積あたりの設備容量は
 増加する。VF 未考慮の場合では、垂直設置は
 増加し続け発散してしまう。しかし VF を考慮
 することにより、どの設置方法でも太陽電池
 モジュールに影がかかり、離隔距離が近づく
 につれ発電量が減少するため、特定の離隔距
 離で設置面積あたりの発電量が最大をとる。
 その時の最適な離隔距離と年間発電量、設置
 面積あたりの発電量が表 1 である。面積当
 たりの発電量では離隔距離が一般的な間隔より
 短くなっているが、モジュール価格を考慮し
 たコスト最小化とすると一般的な間隔に近
 くなる。

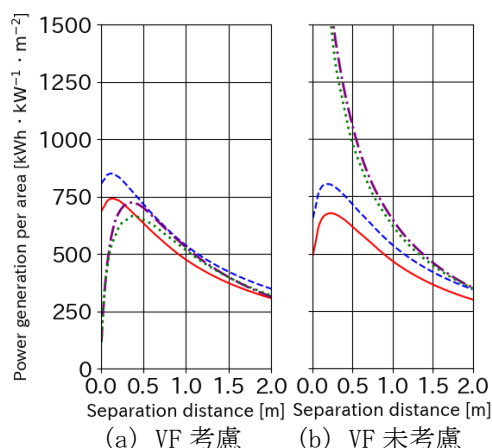


図 8 影とクラスタを考慮した
 面積当たり発電量の比較

この面積当たりで最適な離隔距離の時、
 Case 4 両面受光南北軸垂直設置では、年間
 4226 時間太陽があたるが、3350 時間影がセル
 にかかっている。したがって、ある程度かか
 っている離隔距離が小さい方が設置面積あ
 たりの発電量を多く得ることができる。福井
 市で最も設置面積あたりの年間発電量が多
 くなるのは、Case 2 の両面受光型太陽電池を
 用いた傾斜設置である。したがって、福井市
 の地表面アルベド 0.2 では両面受光型太陽電
 池を用いる場合、垂直設置より傾斜設置の
 方が多く発電できる。設置場所を変え、中
 東など砂漠や高緯度地域では垂直設置の
 方が良い場合もある。

表 1 最適離隔距離とその時の発電量

	Separation distance D [m]	Power generation [kWh]	Power generation per area [kWh·kW ⁻¹ ·m ²]
Case 1 - Mo 30	0.14	238.8	742.3
Case 2 - Bi 30	0.12	267.8	851.5
Case 3 - Bi NS	0.36	103.0	724.3
Case 4 - Bi EW	0.39	102.1	667.2

(2) 影を考慮した地面反射成分の推定手法

当初から角度表現モデルを構築してきたが、
 米サンディア国立研究所などが形態係数モ
 デルの利用を提案し、これと比較しながら進
 めてきた。本提案の角度表現モデルと天空率
 (SVF) 利用の有効性検証のため、福井大学
 1 号館 2 号棟屋上で、裏面日射強度の実験
 を行った。モジュールの大きさは横幅 0.97m、
 縦幅 1.12m であり、垂直に設置した。GHI
 は、屋上に設置した全天日射計によって測
 定し、直達日射量 (DNI) は、直達日射計に
 よって測定した。散乱日射量 (DHI) は、GHI
 から水平面にした DNI を差し引くことで算
 出した。また、モジュール裏面の日射計で測

定した値を裏面日射強度の実測値とし、影中心に置いた日射計で測定した値は天空率を考慮した天空散乱日射強度の実測値とした。この位置に魚眼カメラを設置し、魚眼カメラの写真に対して、空と空以外に分け、天空率を算出した。アルベドは、日射計を下向きに設置し、地面反射日射強度を測定することで算出した。散乱成分推定手法には、従来の均一モデルに加え、Hay & Davies モデル、Reindl モデルを用い、これに提案する角度表現モデルと天空率を考慮して精度の比較を行った。

それぞれのモデルに天空率を考慮

した場合の日射量予測誤差を比較するため、RMSE を図 9 に示す。天空散乱成分を均一モデルと Reindl モデルで推定する場合は天空率を考慮した方が実測値に近い値ことが読み取れる。それぞれ、誤差が約 6 割減少することを確認でき、天空率を考慮することで、裏面日射強度の推定精度が向上するといえる。Hay & Davies モデルで精度が向上しなかった点はモデルの点検を行う。

(3) ライフサイクルアセスメント (LCA) による評価

両面 PV と片面 PV を傾斜角度 10 度から 40 度に変化させた場合の CO₂ 排出原単位とエネルギーペイバックタイム (EPBT) を図 10 に示す。EPBT はすべてのシミュレーション結果においてシステム寿命 (20 年) を大幅に下回っており、どの場合も環境性に優れていることが確認できた。また、EPBT, CO₂ 排出原単位ともに傾斜角度 10 度で最小の値を取っている。1 アレイあたりでは傾斜角度 30 度が最も発電量が多いが、モジュールの傾斜角が増加するほど、支える架台、基礎に必要な重量が増加し、エネルギー投入量や CO₂ 排出量が、発電量が増加する割合よりも大きく増加するためと考えられる。

両面 PV は近年急速に普及が進みつつある。両面を生かすための傾斜角の考慮や 1 軸追尾架台、雪の反射効果など今後検討する必要がある。

また、GIS を用い、乾燥地での利用価値を明らかにするための最適地に関する適地地図は論文を執筆中であり、近日中に発表したい。

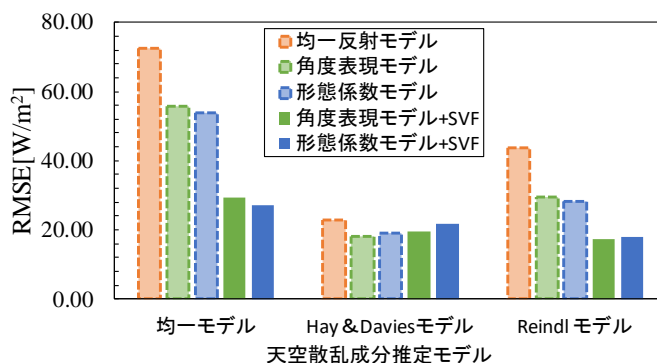


図 9 角度表現モデルと形態係数モデルと天空率 (SVF) 考慮による RMSE

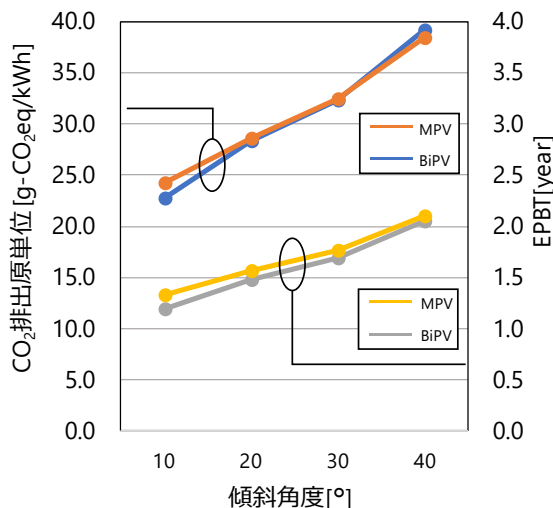


図 10 傾斜角別の CO₂ 排出原単位とエネルギーペイバックタイム (EPBT)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuki Sado, Ryuto Shigenobu, Masakazu Ito
2. 発表標題 Optimization Method of Installation Distance of Bifacial PV Modules Considering Cost, Shadow and Cluster
3. 学会等名 31st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-31) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐戸佑気, 重信颯人, 伊藤雅一
2. 発表標題 両面受光型太陽電池の発電量への影とクラスタの影響
3. 学会等名 若手研究者発表会 (日本太陽エネルギー学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐戸佑気, 重信颯人, 伊藤雅一
2. 発表標題 影とクラスタを考慮した離隔距離最適化手法による両面受光型太陽電池のコスト最適設置間隔
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶋田圭吾, 重信颯人, 伊藤雅一, 津野裕紀, 大関崇
2. 発表標題 垂直設置した両面PVモジュールの影と天空率を考慮した裏面日射強度の推定
3. 学会等名 令和4電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐戸佑気, 重信颯人, 伊藤雅一
2. 発表標題 影を考慮したビューファクタとクラスタによる両面受光型太陽電池の離隔距離最適化手法
3. 学会等名 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Sado, Ryuto Shigenobu, Masakazu Ito
2. 発表標題 Output Estimation Method of Bifacial PV Modules Considering Cluster and Sight Factor and Optimal PV Array Separation Distance
3. 学会等名 PVSEC-30 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野坂良輔, 重信颯人, 伊藤雅一
2. 発表標題 影考慮のための形態係数を用いた両面PVモジュールの裏面日射強度の推定
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐戸 佑気, 重信 颯人, 伊藤 雅一
2. 発表標題 太陽電池モジュールにかかる影とセル配置を考慮した発電量に関する予備検討
3. 学会等名 日本太陽エネルギー学会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

福井大学電力システム研究室
<http://fuee.u-fukui.ac.jp/~pws/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	林 泰弘 (Hayashi Yasuhiro) (40257209)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------