

令和 2 年 7 月 15 日現在

機関番号：55501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06331

研究課題名(和文) 太陽電池セルの高温ホットスポット発生を自動検知する常時監視機能の実現

研究課題名(英文) Realization of a constant monitoring function that automatically detects the occurrence of high temperature hot spots in solar cells

研究代表者

南野 郁夫 (Nanno, Ikuo)

宇部工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：40647723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光発電システムが普及し、火災事例など新たな安全性の問題(重大故障)が生じている。火災原因の1つのホットスポットやその原因のバイパスダイオード(BPD)故障は定期点検により検出する手法が既に確立している。しかし、煩雑で、数年に1度の低頻度点検による手遅れの可能性の問題がある。そこで、本科研費研究により自動診断方法を提案した。さらに、あらゆる環境条件への対応が実用上の課題であることを明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、異常再現モデルと診断ルールにつながる点である。今回実際の故障に即した異常系再現モデルの構築の準備が行えた。今後、実用課題が解決し、提案する異常系再現モデルが完成すれば、故障の原因究明・対策が実現でき、故障状態を見分ける新たな知見と、この知見からこれまでになかった実用的な診断ルールが創出される。このアルゴリズムが住宅用PVの住人の生命と財産を救い、大きな社会的意義になる。

研究成果の概要(英文)：With the spread of photovoltaic power generation systems, new safety problems (serious failures) such as fire cases have occurred. A method has already been established to detect a hot spot, which is one of the causes of a fire, and a bypass diode (BPD) failure, which is the cause of the fire, by periodic inspection. However, it is complicated and there is a problem that it may be too late due to low frequency inspection once every few years. Therefore, we proposed an automatic diagnosis method based on a research funded by KAKENHI. In addition, it was clarified that dealing with all environmental conditions is a practical issue.

研究分野：太陽光発電

キーワード：太陽電池 ホットスポット 自動検知 常時監視

## 1. 研究開始当初の背景

### ① 研究の学術的背景

#### (1). 国内・国外の研究動向及び位置づけ

太陽光発電 (PV) システムが普及し、安全性や寿命の問題が表面化している<sup>1),2)</sup>。太陽光発電が広く普及するまでは、太陽電池の効率や太陽電池モジュールの寿命、単独運転防止、太陽光発電システムのコスト等に注目が集まっていた。しかし、普及が進むにつれ新たな問題が起きている。アメリカやヨーロッパだけの問題と考えられてきた太陽光発電

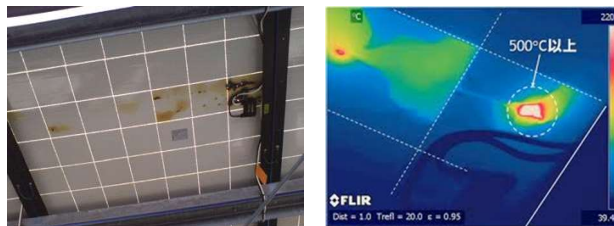


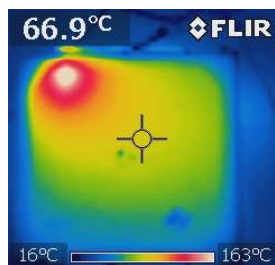
図1 ホットスポットの例

システムの火災が、日本でも発生し報告されてきている (千葉県船橋市消防局から 2014 年 3 月 26 日)<sup>4)</sup>。これ以外にも、京都や新潟などでも複数の火災事故が報告されている。

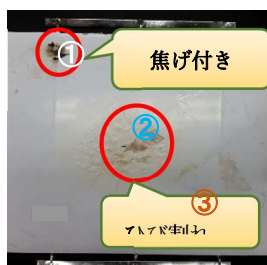
#### (2). 着想に至った経緯

しかし、太陽光発電システムの安全性や効率の低下は、完全に予測できないという課題を持つ。その理由は、問題が常に起こるのではなく限られた条件の限られた場所で確率的に発生するため、予め予測することは困難だからである。それに一度火災が起きると殆どが燃え尽きてしまい、最も激しく燃えたところが判っても、多くの情報は失われている<sup>1)</sup>。そのため火災原因の有力な候補の 1 つである HS が本当の原因かも、HS 発生の正確なメカニズムも十分に解明できていない。このような状況の中で太陽光発電システムの安全を確保するため、現在は IR カメラ等を用い熟練した点検者による保守点検が行われている。この点検が不要なシステム設計または保守点検の自動化が求められている。そのためには火災危険のある温度の高温 HS の輻射伝熱や複雑な対流などの非線形現象解明が課題だった。

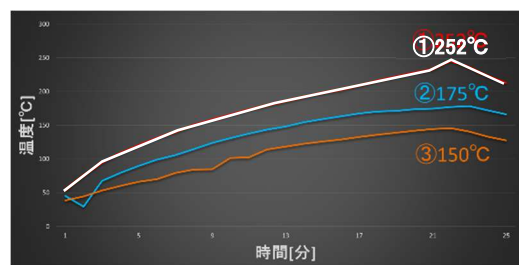
そこで、熊本大学の熱モデル (TDM<sup>7-10)</sup> と山口大学の非線形科学の応用を着想した。これまでの研究により高温 HS を単セルモジュールに部分陰で発生させる現象再現実験により赤外線カメラ画像と焦げ付き画像 (図 2) を得た。HS は 250°C 以上の温度に達した。つぎに太陽電池セルの温度分布をシミュレーションするモデルを MATLAB (制御工学向けソフト) 上でモデル構築し温度分布と温度上昇グラフ (図 3) の再現を試みた。その結果、実験結果 (図 2) と比較し、典型的な条件で数十%の精度で温度分布の予測が可能だと確認した。高温 HS が生じているかの検知を目的とするので十分な精度である。創発的現象を表すモデルはセルオートマトン法を利用し焦げが広がる現象を再現 (図 4) した。単セル太陽電池とホットプレートによる加熱基礎実験からアバランシェ電圧  $V_a$  (逆電圧印加時の降伏電圧) の温度特性の基礎データ収集も行った。



(a) 赤外線カメラ画像

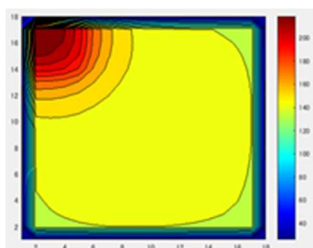


(b) 焦げ付き画像 (写真)



(c) 温度上昇グラフ

図2 高温ホットスポット再現実験結果



(a) 温度分布



(b) 温度上昇グラフ

図3 高温ホットスポットシミュレーション結果

この結果から、25°C 当たり約 1V の変化が起こることと、アバランシェ電圧と短絡電流  $I_{sc}$  には強い相関があること (図 5) を確認した。

#### (3). これまでの研究成果を発展させる内容

本研究では、これまでの研究成果である熱モデルを HS 温度予測に拡張し、HS 形成とい

う熱的現象を電氣的現象として自動検知可能な情報に変換することで、新たな研究成果に発展させる。

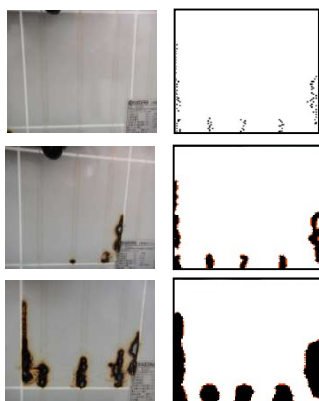


図4 創発現象のシミュレーション結果

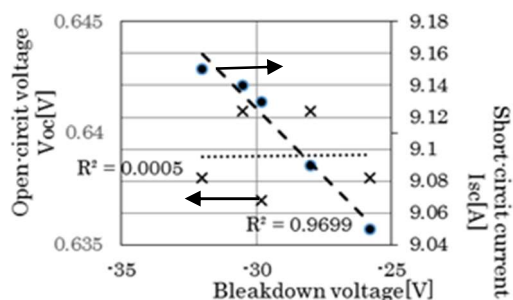


図5 アバランシェ電圧と短絡電流

## 2. 研究の目的

メンテナンスフリーとされる太陽光発電システムの安全性が問題視されている<sup>1),2)</sup>。火災のない安全な太陽光発電の普及には定期点検が重要<sup>2)</sup>だが、保守点検には熟練した点検者と多くの工数を要する。図1に示す500°C程度の太陽電池モジュールのホットスポット(HSと略す)の検出には、赤外線カメラ画像点検などの屋外作業を必要とした。我々は点検作業の自動化を目指し、「HS温度予測モデル」を提案してきた<sup>3)</sup>。本研究では、半導体製造プロセスで実績のある熱モデルをHS温度予測に拡張し、HS形成という熱的現象を電氣的現象として自動検知する新たな手法の開発を目指す。すなわち、HS温度予測モデルに太陽電池の電氣的特性を連成させ、HS発生を自動検知する常時監視機能の実現を目的とした。

## 3. 研究の方法

まず①HSモデルの熱電連成化とストリング化を行う。それと同時に複数高専の屋上に設定された太陽光発電システムをIRカメラで撮影し、実際のHS実態とモデルの比較検証も行う。つぎに基本的想定に致命的な問題が無いことを確認するための②基礎実験検証を行う。つぎに高温HS熱モデルを電気連成したモデルを応用し③HS連成モデルを応用した新HS検知技術提案を行う。さらに提案した新技術を監視装置あるいはPCS(パワーコンディショナ)への搭載を共同研究などで関係のあるメーカーに提案し、④高温HSの新たな検知技術の実環境での検証を行う。最終的には多くの一般家庭用太陽光発電システムやメガソーラーを用い高温HSが検出できるかを検証し、太陽光発電システムの火災防止のための「PVセル内高温HS検知技術」を完成させる。

## 4. 研究成果

太陽光発電システムが普及し、火災事例など新たな安全性の問題が生じている。火災原因の1つのホットスポットやその原因のバイパスダイオード(BPD)故障は定期点検により検出する手法が既に確立している。しかし、煩雑で、数年に1度の低頻度点検による手遅れの可能性の問題がある。そこで、本科研費研究により自動診断方法を提案した。提案方法は、最大電力点MPPの時間的な動きに注目し、自然な部分陰を利用するものである<sup>15-16)</sup>。ただし、セルサイズの一定の大きさの陰を一定方向に、一定速度で移動させた場合の想定である(図6参照)。しかしこの条件は自然な陰でないことが問題で、あらゆる環境条件への対応が実用上の課題であることを明確になった。

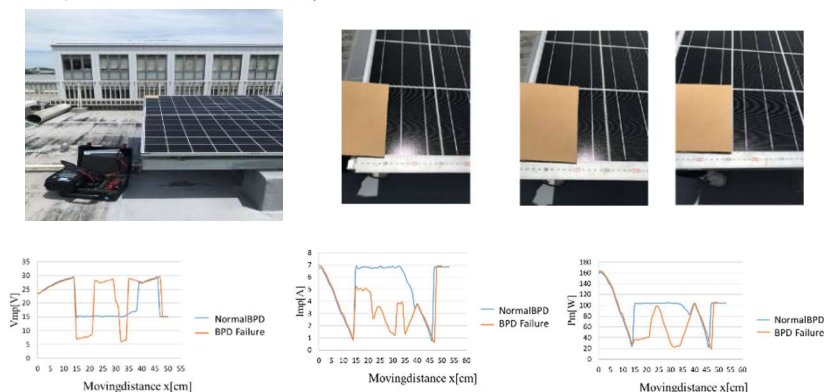


図6 セルサイズで一定方向・一定速度の陰実験

そのため、サイバーフィジカルシステム CPS の考えに基づき、故障状態をシミュレーション上で再現するためのモデルの提案を行った<sup>17)</sup> (図 7,8 参照)。このように、今回実際の故障に即した異常系再現モデルの構築の準備が行えた。また、科研費研究の温度分布シミュレーション研究<sup>17-22)</sup>の中から、20)が日本太陽エネルギー学会の論文賞を受賞した。16)が奨励賞を受賞した。

今後、実用課題を解決させるため、提案する異常系再現 CPS モデルを完成させ、故障の原因究明・対策を実現し、故障状態を見分ける新たな知見と、この知見からこれまでになかった実用的な診断ルールを創出したい。このアルゴリズムが住宅用 PVS の住人の生命と財産を救うものと信じているからである。

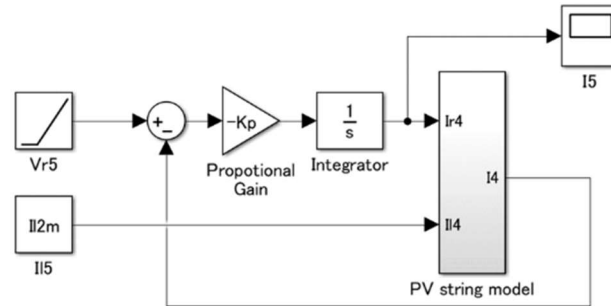


図 7 故障再現モデル (学会で提案)

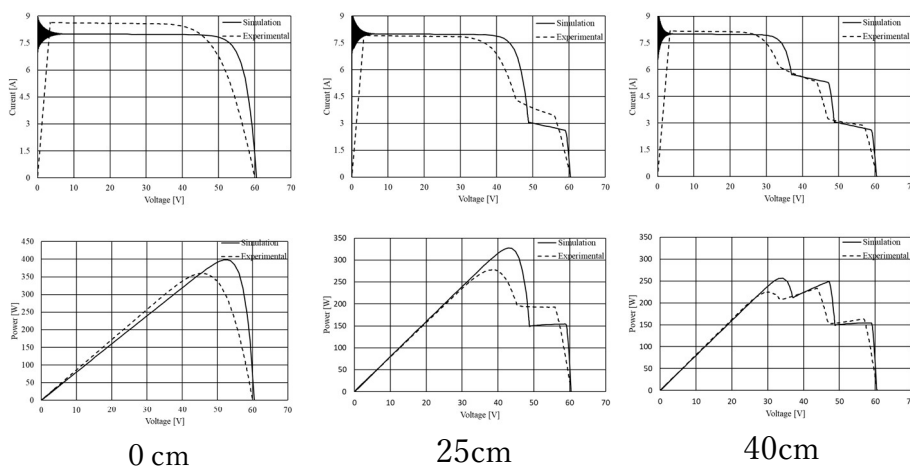


図 8 実験とシミュレーションの比較

【参考文献】

- 1) 加藤和彦：「太陽光発電システムの「品質」とはなにか」、平成 26 年電気学会全国大会、愛媛、7-S10-1(2014.3.18-20)
- 2) 大関崇、吉富政宣：「太陽光発電の火災リスクに関して」、安全工学、Vol.52、No.3、pp162-172(2013)
- 3) 山下佳詩・伊藤賢也・南野郁夫：“太陽電池セル内高温ホットスポット形成に対するセルオートマトンを用いた現象再現の検討”、非線形科学と時間学の交流、山口大学 常磐キャンパス、pp20 (2016.3.25)
- 4) 加藤和彦ほか：「太陽光発電システムの火災リスク対策における現状と課題(1)」、一般社団法人日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第 8 回セミナー (2014.3.26)
- 5) 松川洋、黒川浩助：「太陽電池モジュールの短時間間隔における温度特性解析」、平成 16 年 10 月、日本太陽エネルギー学会・日本エネルギー風力協会合同発表会
- 6) 南野郁夫：「熱プロセスの均一温度制御に関する研究」、熊本大学大学院自然科学研究科(2007 年 9 月)
- 7) 南野郁夫・橋田真平・松永信智・川路茂保：“熱系のフィードバック構造型モデルに基づく均一温度制御系の設計”、電気学会論文誌、Vol.127-C、No.12、pp.2126-2132(2007.12)
- 8) Ikuo Nanno, Nobutomo Matsunaga, Shigeyasu Kawaji:” A New Model with Feedback Structure for Thermal Process and its Application to Decoupling Control”, Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2006), Paris, pp.507-512, Dec.(2006)
- 9) Ikuo Nanno, Nobutomo Matsunaga, Shigeyasu Kawaji:” Controller Design for Uniform Heating using New Model with Feedback Structure”, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006 (SICE-ICCAS 2006), Busan, pp.1063-1068, Oct.(2006)
- 10) Ikuo Nanno, Shimpei Hashida, Nobutomo Matsunaga, Shigeyasu Kawaji:” Experimental Study on Uniform Heating Control based on Temperature Difference Model”, Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2007), Kumamoto, WA2-C-4, pp.1-6, May(2007)南野郁夫、原岡了佑：「部

- 分陰による太陽光発電の発電量低下を回復させる陰対策リレーの提案」、太陽／風力エネルギー講演論文集、109、pp397-400 (2013.11)
- 11) 南野郁夫、原岡了佑：「部分陰による太陽光発電の発電量低下を回復させる陰対策リレーの提案」、太陽／風力エネルギー講演論文集、109、pp397-400 (2013.11)
  - 12) 南野郁夫、三角修一：「太陽光発電設備の発電効率向上のための逆流防止リレーの開発と評価」、太陽エネルギー、Vol39、No.2 (2013.3.31)
  - 13) H. Kitahata, A. Osa, H. Miike, et al., "Oscillation and Synchronization in the Combustion of Candles, J. Physical Chemistry A, Vol. 113(2009), 8164.
  - 14) 南野郁夫：特願 2014-61836 「リレー装置及び太陽光発電システム」(2014.3.25)
  - 15) Nao Michinaga, Rahul Promprasit Seet, Ikuo Nanno, Constant Monitoring Method using Time Change of MPP with Open-circuit Failure BPD in PV string, (ICEE2019), Proc. of ICEE2019, No. ICEE19J-060, Hong Kong, (2019)
  - 16) 小山秀斗, 南野郁夫：「BPD 開放故障診断に有効な 15cm 角の板を移動させる陰データ生成方法の提案」、令和元年度（第 70 回）電気・情報関連学会中国支部連合大会、鳥取、2019 年 10 月 26 日
  - 17) 村上諄, 南野郁夫：「太陽電池アレイ用電気モデルの FB による直並列合成方法の提案」、令和元年度（第 70 回）電気・情報関連学会中国支部連合大会、鳥取、2019 年 10 月 26 日
  - 18) 野坂龍之介, 濱里直也, 中村徹哉, 南野郁夫：「宇宙用太陽電池の電流集中再現モデルの提案と温度分布シミュレーション」、2019 年電気学会産業応用部門大会、2-S15-4, pp. II-43-46(2019.8.22)
  - 19) 浦松司, 南野郁夫, 濱田俊之, 桶真一郎, 石倉規雄, 藤井雅之：「雷サージ印加時の BPD 内部温度シミュレーション用電気モデル」、2019 年電気学会産業応用部門大会、2-S15-5, pp. II-47-50(2019.8.22)
  - 20) 山本稜之, 和木大祐, 南野郁夫：「部分陰によりホットスポットが発生した PV セルの温度分布を予測する連成モデル」、太陽エネルギー、Vol.45(3), pp.99-104 (2019)
  - 21) Takayuki Yamamoto, Daisuke Wagi, Ikuo Nanno: "New Coupled Model for Prediction of the Temperature Distribution in a PV Cell with a Hot Spot Induced by Partial Shading", ICRERA2018, ID:319, pp.1-5(2018)
  - 22) Ikuo Nanno, Tarek Ahmed, Masayuki Takamori: "Advanced Photovoltaic MPPT Control Method Using an Electromagnetic Relay for Solving the Partial Shade Problem", IEEE PEDS2017, 368, pp.136-141 (2017.12.13)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>山本稜之, 和木大祐, 南野郁夫                       | 4. 巻<br>45(3)     |
| 2. 論文標題<br>部分陰によるホットスポットが発生したPVセルの温度分布を予測する連成モデル | 5. 発行年<br>2019年   |
| 3. 雑誌名<br>Jornal of Japan Solar Energy Society   | 6. 最初と最後の頁<br>1-6 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし                    | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難           | 国際共著<br>-         |

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>道永尚, 矢田陽太郎, ラフル プロンブラシト シト, 南野郁夫   |
| 2. 発表標題<br>FFの時間変化を利用したPVストリング内BPD開放故障の常時監視方法 |
| 3. 学会等名<br>日本太陽エネルギー学会                        |
| 4. 発表年<br>2018年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>南野郁夫, 道永尚                                     |
| 2. 発表標題<br>P-V平面上のMPPベクトルの特異点に注目した常時PVストリング内BPD故障診断方法の提案 |
| 3. 学会等名<br>電気学会, 全国大会                                    |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>南野郁夫                         |
| 2. 発表標題<br>太陽電池は不安定系か？（リアプノフ安定と電流集中）    |
| 3. 学会等名<br>宇宙エネルギーシンポジウム（JAXA宇宙研）（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takayuki Yamamoto, Daisuke Wagi, Ikuo Nanno  |
| 2. 発表標題<br>New Coupled Model for Prediction of the Temperature Distribution in a PV Cell with a Hot Spot Induced by Partial Shading |
| 3. 学会等名<br>ICRERA2018 ( 国際学会 )  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Nao Michinaga, Rahul Promprasit Seet, Ikuo Nanno   |
| 2. 発表標題<br>Constant Monitoring Method using Time Change of MPP with Open-circuit Failure BPD in PV string |
| 3. 学会等名<br>ICEE2019 ( 国際学会 )  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ikuo Nanno, Tarek Ahmed, Masayuki Takamori   |
| 2. 発表標題<br>Advanced Photovoltaic MPPT Control Method Using an Electromagnetic Relay for Solving the Partial Shade Problem |
| 3. 学会等名<br>IEEE PEDS2017, Poster Session I , Room 301A and 301B , 368, pp.136-141 ( 国際学会 )                                |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Daisuke Wagi, Ikuo Nanno   |
| 2. 発表標題<br>Prediction Simulation using Coupled Model Temperature Distribution on PV cell in which Hotspot has Occurred due to Partial shade |
| 3. 学会等名<br>PVSEC-27 , Area8 : PVsystem Including BOS Components , Lake Biwa Otsu Prince Hotel , Japan ( 国際学会 )                              |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>高森雅之・南野郁夫                      |
| 2. 発表標題<br>部分陰PV 設備向け陰対策リレーのMPPT 組合せ問題の実証 |
| 3. 学会等名<br>平成29年度JSES・JWEA合同研究発表会，アオーレ長岡  |
| 4. 発表年<br>2017年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>和木大祐，南野郁夫  |
| 2. 発表標題<br>温度差モデルを用いた部分陰により高温ホットスポットが発生したPVセルの温度分予測シミュレーション     |
| 3. 学会等名<br>平成29年電気学会産業応用部門大会，JIASC2017のUSB，2-0S1-1，pp. -51- -54 |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小山秀斗，南野郁夫                                   |
| 2. 発表標題<br>BPD開放故障診断に有効な15cm角の板を移動させる陰データ生成方法の提案       |
| 3. 学会等名<br>令和元年度（第70回）電気・情報関連学会中国支部連合大会，鳥取，2019年10月26日 |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>村上諒，南野郁夫                                    |
| 2. 発表標題<br>太陽電池アレイ用電気モデルのFBIによる直並列合成方法の提案              |
| 3. 学会等名<br>令和元年度（第70回）電気・情報関連学会中国支部連合大会，鳥取，2019年10月26日 |
| 4. 発表年<br>2019年  |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>野坂龍之介, 濱里直也, 中村徹哉, 南野郁夫                           |
| 2. 発表標題<br>宇宙用太陽電池の電流集中再現モデルの提案と温度分布シミュレーション                 |
| 3. 学会等名<br>2019年電気学会産業応用部門大会, 2-S15-4, pp. -43-46(2019.8.22) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>浦松司, 南野郁夫, 濱田俊之, 桶真一郎, 石倉規雄, 藤井雅之                 |
| 2. 発表標題<br>雷サージ印加時のBPD内部温度シミュレーション用電気モデル                     |
| 3. 学会等名<br>2019年電気学会産業応用部門大会, 2-S15-5, pp. -47-50(2019.8.22) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| <p>本科研究費研究で、論文賞と奨励賞を受賞した。</p> <p>日本太陽エネルギー学会 2019年度 論文賞；<br/>山本稜之、南野郁夫<br/>「部分陰によるホットスポットが発生したPVセルの温度分布を予測する連成モデル」<br/>2020年5月</p> <p>電気学会中国支部 奨励賞：<br/>小山秀斗<br/>「BPD開放故障診断に有効な15cm角の板を移動させる陰データ生成方法の提案」<br/>2020年2月1日</p> |
|--|

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                         | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                       | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 濱田 俊之<br><br>(Hamada Toshiyuki)<br><br>(20733695) | 宇部工業高等専門学校・電気工学科・准教授<br><br><br><br>(55501) |    |