

Shunt Spot Diameter Shrinkage Stop Mechanism of Thermal Runaway Phenomenon in Solar Cells

Ryuta KAWAMURA^{*1}Ikuo NANNO^{*2‡}Kazuya MURAI^{*3}Tetsuya NAKAMURA^{*4}

太陽電池における熱暴走現象のシャントスポット径収縮停止メカニズム

河村 龍太¹南野 郁夫^{2‡}村井 和弥³中村 徹哉⁴

Abstract

In order to elucidate the mechanism of thermal runaway of the solar cell, we created a simulation model consisting of positive feedback due to the temperature characteristics of the shunt spot and negative feedback due to the thermal resistance of the spot, and calculated the temperature distribution of the solar cell. In this paper, we report the simulation results of the shrinkage rate of the shunt spot diameter, the change of the shrinkage rate due to the design change of the solar cell, and the change of the shrinkage rate due to the addition of electrode resistance. Furthermore, we propose design formulas for elucidating the spot diameter stop mechanism.

Keywords: thermal runaway, spot diameter, electrode resistance, positive and negative feedback model
キーワード: 熱暴走, スポット径, 電極抵抗, 正負帰還モデル

1. はじめに

高効率薄膜3接合太陽電池の光照射実験で、熱暴走の発生が確認された^{1,2)}。熱暴走によって太陽電池(PV)セルは破損する恐れがあるため、その耐性向上が課題である。そこで我々は、実験では計測が困難な耐性向上に関するパラメータを予測するため、シミュレーションを実施している³⁾。これまでの研究で、温度特性による正帰還(以降温度特性正帰還と呼ぶ)と熱伝導や熱輻射の排熱による負帰還で構成した正負帰還モデル⁴⁾を作成し、温度特性正帰還が負帰還を上回った場合にシャント電流が集中し、熱暴走が発生することをシミュレーションで確認した。また、熱暴走によるシャント電流の範囲であるシャントスポット(以降スポットと呼ぶ)の温度の上昇は、スポットの熱抵抗の増加により説明した⁵⁾。しかし、温度上昇の停止については、未解明であった。そこで、本論文では、スポット径の収縮停止(スポット径収縮停止メカニズム)に関するシミュレーションモデルと簡易な設計式を提案し、それに基づく熱暴走の耐性向上に関する評価結果を報告する。

2. 熱暴走発生メカニズム

一般的に、PVセルは温度が上昇すると出力電圧が低下する。同じセルの中に高温領域と低温領域が存在すると、各領域は並列接続となるため、Fig. 1のように各領域の電流の向きが逆となる動作点(例えば各領域の電流の和がゼロとなる開放状態)が現れる。

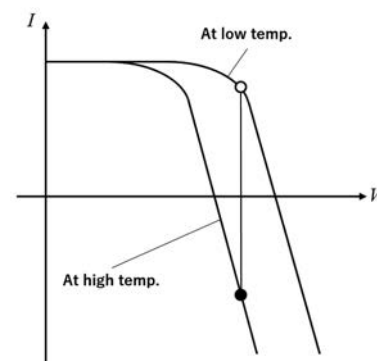


Fig. 1 I-V temperature characteristics of a solar cell.

*1 Advanced course, NIT, Ube College

*2 Professor, Department of mechanical engineering, NIT, Ube College, 2-14-1 Tokiwadai, Ube-city, Yamaguchi 755-8555, Japan
 ‡e-mail: nanno@ube-k.ac.jp

*3 Former advanced course, NIT, Ube College

*4 Japan Aerospace Exploration Agency

Received: August 6 2022, Accepted: November 1 2022

*1 宇部工業高等専門学校 生産システム工学専攻

*2 宇部工業高等専門学校 機械工学科 教授 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台 2-14-1)
 ‡e-mail: nanno@ube-k.ac.jp

*3 元宇部工業高等専門学校 生産システム工学専攻

*4 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

(原稿受付: 2022年8月6日, 受理日: 2022年11月1日)

例として、セルが開放状態の時に、部分陰や周囲環境の影響により、温度分布が Fig.2 のように生じると、低温領域で発電した光電流が高温領域で逆流電流として流入されジュール熱により発熱する。その結果、高温領域の電流はさらに増加し発熱が加速する。これが PV セルの熱暴走発生メカニズムで、本研究でターゲットとする発熱現象である。

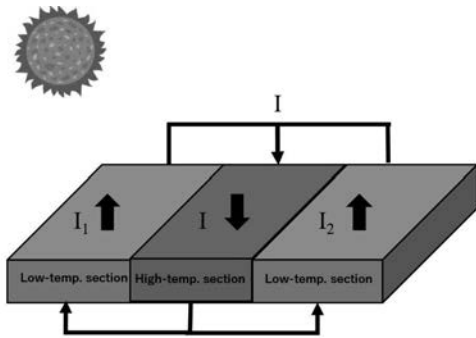


Fig. 2 Schematic diagram of backflow in a solar cell.

3. スポット径収縮停止メカニズムと設計式

3.1 スポット径収縮メカニズム

これまでの研究で、温度特性正帰還の他に、スポット径低下による正帰還も熱暴走発生に関係している仮説(スポット径収縮メカニズム)を考えた。熱暴走発生によりセル内に温度差が生じると、高温領域に電流が集中する。細かくメッシュ分割した状態で考えると、高温領域の中でも特に高温のメッシュに逆流電流が集中する。逆流電流の合計(光電流)は一定なので、1メッシュの逆流電流が増加すると、逆流するメッシュ数は減少するというメカニズムである。このスポット径収縮メカニズムは実験により立証された⁵⁾。

3.2 スポット径収縮停止メカニズム

一方で、実験^{2,5)}においてスポット径が無限に収縮することはなかった。その理由の一つとして、低温領域の輻射による熱流が、高温領域の輻射による熱流を上回った時にスポット径の収縮が止まる仮説を新たに考えた。Fig.3 の上図に示す熱の流れは、スポット径が大きいとき面積 S_1 、温度 T_1 の高温領域表面からの熱流 Q_1 が支配的な場合を示す。スポット径が小さくなると、熱は熱伝導により面内方向に移動し、面積 S_2 、温度 T_2 の低温領域表面から出ていく熱流 Q_2 が支配的になると考えられる (Fig.3 下図参照)。Fig.3 の熱回路網を Fig.4 に示す。ここでは太陽電池から周囲環境への熱伝達は考慮していない。Fig.4 より、スポット径が小さく Q_1 が無視できる場合、スポットと周囲環境の熱抵抗は熱伝導の熱抵抗 β^{-1} と熱放射の熱抵抗 γ_2^{-1} によって決定する。その結果、温度の上昇とスポット径の収縮は停止するという仮説がスポット径収縮停止メカニズムである。

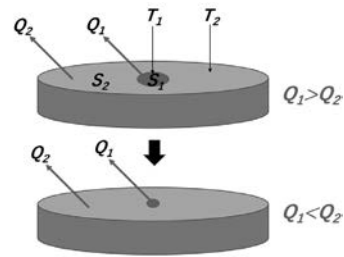


Fig. 3 Spot diameter stop mechanism.

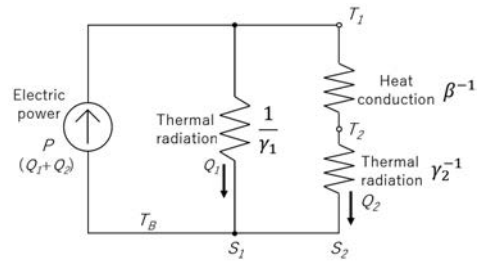


Fig. 4 Thermal network of Fig. 3.

3.3 設計式の提案

Fig.4 に基づくとスポット径収縮が停止したときの最高温度 T_{max} は、以下の式が成り立つ⁶⁾。

$$T_{max} = R_{thmax} \times P + T_B \tag{1}$$

ただし、 R_{thmax} は熱抵抗の最大値、 P はセルの発生電力、 T_B は周囲温度である。 R_{thmax} と P は以下の式で表せる。

$$R_{thmax} = \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma_2} = \frac{d}{\lambda A_s} + \frac{1}{h_r S_{all}}, \quad P = VI \tag{2}$$

ただし、 β は熱伝導コンダクタンス、 γ_2 はスポット径外の輻射コンダクタンス、 d は高温領域と低温領域の距離、 λ は熱伝導率、 A_s は断面積、 h_r は有効輻射熱伝達率、 S_{all} はセル面積である。なお、 d は、「高温/低温領域の境界とセル端の中心」から「高温領域の中心」までの距離と定義した (Fig.5 参照)。断面積 A_s は、熱伝導に関する断面であり、今回は高温領域と低温領域の境界の長さ⁷⁾と厚さの積より求めた。

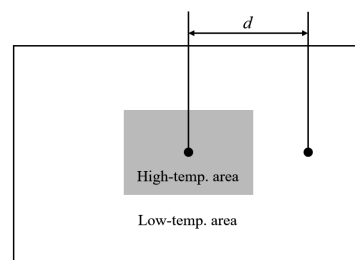


Fig. 5 Schematic diagram of distance between high- and low-temperature sections.

また、有効輻射熱伝達率 h_r は、

$$h_r = \sigma \times f \times (T_A^2 + T_B^2) \times (T_A + T_B) \quad (3)$$

であり、 σ はステファンボルツマン定数、 f は放射率、 T_A は物体の温度である。(2)、(3)式を(1)式に代入すると、以下の式が得られる。

$$T_{max} = \left(\frac{d}{\lambda A_s} + \frac{1}{(\sigma \times f \times (T_A^2 + T_B^2) \times (T_A + T_B)) S_{cell}} \right) \times VI + T_B \quad (4)$$

(4)式が、スポット径収縮が停止した時の、最高温度 T_{max} を予測する簡易設計式になり、温度が停止するとき、スポット径も停止すると考える。設計式の計算では、計算により求まる T_{max} の値を T_A に代入することを繰り返し、 T_{max} の計算値が変わらなくなった時の値を最高温度とする。

4. シミュレーションモデル

4.1 正負帰還モデル

これまでの研究⁴⁾で、1つのPVセルの電気特性から発熱量を算出する電気モデル(Emodel)と、発熱量から温度分布を算出する温度モデル(Tmodel)を組み合わせた連成モデル^{7,8)}を提案し、連成モデルを正帰還と負帰還にまとめた正負帰還モデルを提案した(Fig. 6 参照)。本モデルは薄膜3接合太陽電池^{1,2)}を想定して作成したが、逆流電流で発生するエネルギーが全て熱に変換されると仮定した他、現象の再現と簡易化の観点から単層構造と近似した。正負帰還モデルでは、熱暴走の原因となる電流集中による温度上昇のフィードバックを温度特性正帰還、熱伝導や熱輻射による温度低下のフィードバックを負帰還とし、それぞれをブロック線図上でまとめた。本モデルは、1つのPVセルを n 個のメッシュに分割することでセルの各領域を表現した。隣り合うメッシュとの熱干渉などから各メッシュの温度を行列計算することで、温度分布を出力する構成である。Emodel は、光電流と外部からセルに流入する電流、各メッシュの温度を入力とし、セル全体に印加されている電圧と各メッシュの電流を算出する。Tmodel は、温度差行列を用いることで、熱伝導と熱輻射を計算する。このモデルは、温度差モデル TDM⁹⁾、アドミタンス行列モデル¹⁰⁾を基にした。今回は周辺環境として宇宙空間を想定し、熱伝達は省いた。なお、正負帰還モデルでは、ステップ関数で特定のメッシュの温度を上昇させ、ホットスポットのきっかけを発生させることで、電流集中による熱暴走現象を引き起こした。本モデルの作成には、MATLAB/Simulink (数値計算言語ソフトウェア) を用いた。

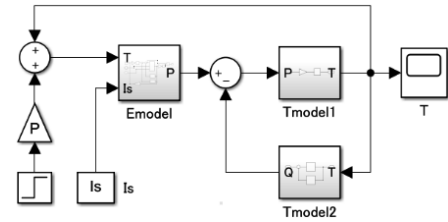


Fig. 6 Positive and negative feedback model.

4.2 電極抵抗

負帰還の効果を増大させるための太陽電池の設計として、電気抵抗に着目し、電極抵抗がスポット径の収縮を抑制する可能性があると考え、正負帰還モデルの Emodel に電極抵抗を追加した。本研究では楕型の表面電極を想定した(Fig. 7 参照)。電極抵抗の構成は、メッシュに付加するメッシュ抵抗 R_{er} とメッシュ間に付加する共通抵抗 R_{erc} を想定した(Fig. 8 参照)。電極抵抗に発生する電圧降下は、Mesh model の出力電流に抵抗(R_{er} , R_{erc})をかけ、電圧降下を減算するフィードバックを追加して表現した(Fig. 9 参照)。メッシュ抵抗 R_{er} は、 $1 \times n$ の行列で要素ごとの乗算を行い、また共通抵抗 R_{erc} は、対角成分を共通抵抗値とした 84×84 の対角行列で、接続行列 M_c , M_{ct} と行列の乗算を行って求めた。また、シミュレーションエラー対策として、角周波数をフィードバックさせた一時遅れを設置した(Fig. 10 参照)。

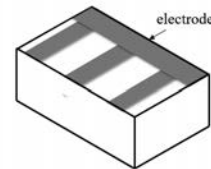


Fig. 7 Schematic diagram of comb-type electrode.

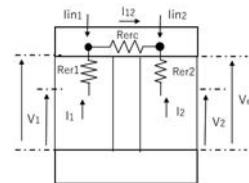


Fig. 8 Electrode structure of simulation model.

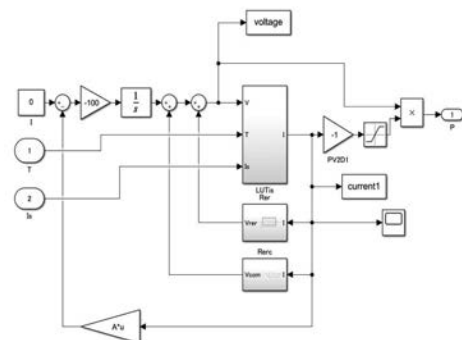


Fig. 9 Electrode resistance model in Emodel.

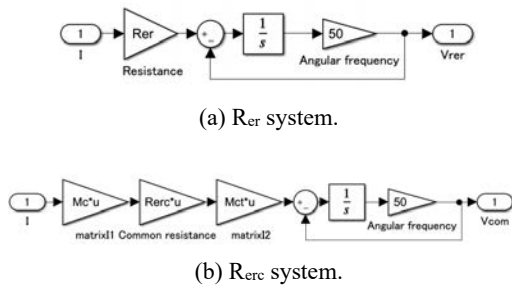


Fig. 10 Block diagram in the electrode resistance of Fig. 9.

5. シミュレーション条件

スポット径収縮停止メカニズムの仮説を立証するために、本論文では、前章で述べた正負帰還モデルを用いて5つのシミュレーションを行う。1つ目は部分陰の大きさによる影響評価、2つ目は電極抵抗による影響評価、3つ目はセル面積に対するスポット径の影響評価、4つ目は熱伝導率の影響評価、5つ目は設計式の評価である。電流が逆流しているメッシュの数と1メッシュ当たりの面積の積よりスポット面積を求め、スポット径の変化を確認した。また、セルの物性値や行列計算は、MATLAB上のmファイルで行う。なお、p51の「使用記号と値」にシミュレーションで使用した各パラメータを示し、シミュレーションごとに変更する条件は、それぞれの節で説明する。

5.1 部分陰の大きさによる影響

部分陰の条件に差をつけるため、14×14の196メッシュを用いて、二つの部分陰条件でシミュレーションを行い、スポット径の変化を確認した。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196

(a) Shadow condition 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196

(b) Shadow condition 2.

Fig. 11 Simulation conditions using 196 meshes.

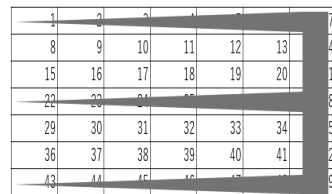
Fig. 11に2つの部分陰条件を示す。陰のメッシュを薄色(低温領域)、陰でないメッシュを濃色(高温領域)で示す。なお、本モデルは電極抵抗を含んでいない。

5.2 電極抵抗による影響

電極抵抗の効果を調べるために必要な49メッシュモデルを作成した。ここでは、シミュレーション時間の観点から49メッシュとした。部分陰条件をFig. 12(a)に、電極抵抗の模式図をFig. 12(b)に示す。シミュレーションは電極抵抗なしと、ありの二回に分けて行い、スポット径の変化を確認した。Fig. 12(b)において、濃い色で示した部分を電極とした。電極が太い部分は抵抗が低く、電極が細い部分ほど抵抗が高い。また、電極が通っていないメッシュ間は抵抗を最も高く設定している(Fig. 12(c)参照)。本シミュレーションでは、Fig. 12(c)の縦横隣接する抵抗値の大きい方を共通抵抗 R_{erc} [Ω]としており、メッシュ抵抗 R_{er} は0 [Ω]としている。

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	32	33	34	35
36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49

(a) Shadow condition.



(b) Schematic diagram of comb-type electrode.

0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1
0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1
0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1

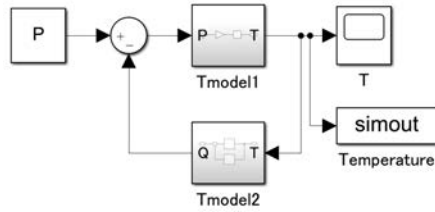
(c) Resistance condition.

Fig. 12 Simulation condition for spot diameter by electrode resistance.

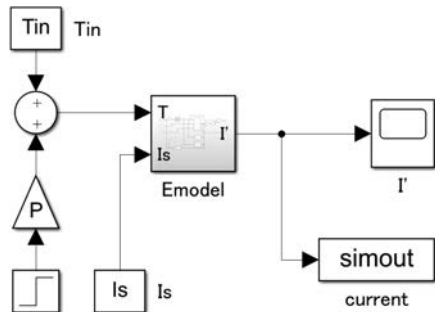
5.3 セル面積に対するスポット径による影響

シミュレーション複雑化防止の観点から、正負帰還モデルの温度モデルと電気モデルを分けて2つのモデルにし(Fig. 13参照)、メッシュ数を変更しながら、中心1メッシュに電力を与えた時のセル面積に対するスポット径の変化を確認した。温度モデルのシミュレーションで、それぞれのメッシュの温度分布をFig. 13(a)のTmodel1の出力から確認し、その後、温度モデルでのシミュレーショ

ンで得た温度を入力として電気モデルのシミュレーションを行い、セル面積に対するスポット径を確認した。スポット径は、電流分布から電流が逆流しているメッシュ数より求めた。今回は、メッシュ数を Table 1 の7つの条件に分けた。



(a) Temperature model.



(b) Electrical model.

Fig. 13 Shrinkage simulation model.

Table 1. Conditions for the number of meshes.

Number of meshes	1600(40×40)
	2025(45×45)
	2500(50×50)
	3025(55×55)
	3600(60×60)
	4225(65×65)
	4900(70×70)

5.4 熱伝導率による影響

熱伝導率を4つの条件に分け、シミュレーションを行った(Table 2 参照). さらに、部分陰条件を参考に値を決め、簡易設計式の計算を行った(Table 3 参照). なお、部分陰条件は196メッシュシミュレーションで用いた Fig. 11 (a) の条件でシミュレーションを行った。

Table 2 Thermal conductivity conditions.

Thermal conductivity [W/m · K]	100
	168 (Si)
	200
	250

Table 3 Design formula calculation conditions.

Symbol	Meaning	Values and units
d	Distance	$2.57 \times 10^{-2} \text{ m}$
λ	Thermal conductivity	Table 2 reference
A_s	Cross-sectional area	$1.96 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
σ	Stefan Boltzmann constant	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
f	Emissivity	0.90 -
T_A	Object temperature	25.0°C
T_B	Ambient temperature	25.0°C
S_{all}	Area	$2.74 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
V	Voltage	3.00 V
I	Electric current	0.50 A

5.5 設計式の評価

Table 4 に示す通り、距離を5つの条件に分け、シミュレーションを行った。今回は、「使用記号と値」に示す W を d/W =一定となるように変更することで距離の条件を分ける。そのため、距離 d の変更により、 W, S_{all}, A_s を変化させた。また、熱伝導率を $168 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$ でシミュレーション計算を行った。なお、設計式の計算は、Table 3 を使用し、部分陰条件は196メッシュシミュレーションで用いた Fig. 11 (a) の条件とする。

Table 4 Distance conditions

d [m]	W [m]	S_{all} [m ²]	A_s [m ²]
1.50×10^{-2}	4.67×10^{-2}	1.60×10^{-3}	1.39×10^{-6}
2.00×10^{-2}	6.22×10^{-2}	2.13×10^{-3}	1.65×10^{-6}
2.57×10^{-2}	8.00×10^{-2}	2.74×10^{-3}	1.96×10^{-6}
3.00×10^{-2}	9.33×10^{-2}	3.20×10^{-3}	2.19×10^{-6}
3.50×10^{-2}	1.09×10^{-1}	3.73×10^{-3}	2.46×10^{-6}

6. シミュレーション結果

6.1 部分陰の大きさによる影響

部分陰条件を変更してシミュレーションした結果を Table 5 に示す。部分陰条件1, 2でシミュレーションした結果から、陰の大きさが異なっても、スポット径が同じ大きさで停止することを確認した。また、スポット径は196メッシュ分割した中心に発生することを確認した。

Table 5 Change of the spot diameter by the shadow condition change

Shadow condition	Spot area [m ²]
1	1.68×10^{-4}
2	1.68×10^{-4}

6.2 電極抵抗による影響

シミュレーションした結果を Table 6 に示す。電極抵抗を追加することにより、スポット面積が大きい状態で停止

し、スポット径収縮を抑制する効果があることが分かる。また、スポット径収縮を抑制することにより、電流集中している中心のメッシュの最高温度 T_{max} も抑制できている。

Table 6 Electrode resistance model simulation result

Electrode resistance	Maximum temperature [°C]	Spot area [m ²]	Percentage of spot area [%]
あり	132	2.80×10^{-4}	10.2
なし	159	5.59×10^{-5}	2.04

6.3 セル面積に対するスポット径による影響

セル面積に対するスポット径をシミュレーションした結果を、Fig. 14 に示す。温度モデルと電気モデルに分けてシミュレーションした結果から、セル面積に対するスポット径は0.165%まで小さくなり、約0.2%を中心に上下し、その値から収縮せず、収縮が停止することを確認した。

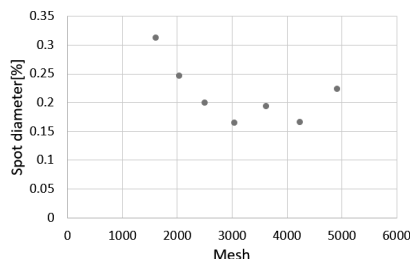


Fig. 14 Number of meshes and spot diameter

6.4 熱伝導率による影響

熱伝導率を変更しシミュレーションした結果を Table 7 に、シミュレーション結果と設計式による計算値の比較を Fig. 15 に示す。Table 7 より、熱伝導率が大きい、つまり、低温領域への熱流が大きくなりやすい条件ではスポット面積が大きい状態で停止している。さらに、Fig. 15 より、熱伝導率が大きいときは最高温度が小さくなるのが分かる。また、簡易設計式による計算値とシミュレーション結果の波形の傾向が一致していることから、簡易設計式を用いた予測は可能であると考えられる。シミュレーション結果は、設計式による計算値の0.380~0.646倍の値になっている。このことを考慮すれば、実際に試作品を製作し実験を行わなくても、最高温度がどれくらいになるかを予め予測することができ、試作の回数を削減できると考える。

Table 7. Simulation results by changing the thermal conductivity

Thermal conductivity [W/m·K]	Spot area [m ²]	Percentage of spot area [%]
100	1.12×10^{-4}	4.08
168 (Si)	1.68×10^{-4}	6.12
200	2.24×10^{-4}	8.16
250	7.83×10^{-4}	28.6

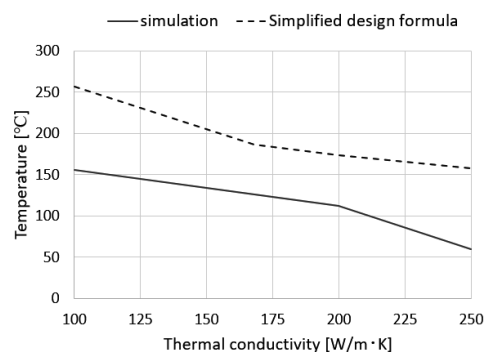


Fig. 15 Comparison of measured and calculated values when changing thermal conductivity

6.5 設計式の評価

太陽電池のサイズを意味する距離 d を変更した時のシミュレーション結果と簡易設計式の計算値の比較を Fig. 16 に示す。シミュレーション結果と簡易設計式による計算値はどちらも距離 d を大きくしたときに最高温度が減少しており、2つの波形の傾向が一致していることから、簡易設計式を用いた計算値から予測することが出来ると考える。両者の比率は0.60~0.75倍の範囲であった。この差の要因として、高温/低温領域の境界断面積や距離の定義が挙げられる。断面積や距離の定義を変更し、改良を行えば計算値の誤差が減ると考える。本論文で提案した簡易設計式を使用すれば、太陽電池の安全設計及び施策の工数と期間の削減に役立てることが出来ると考える。

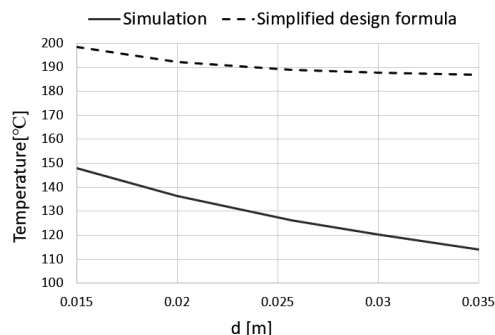


Fig. 16 Comparison of measured and calculated values when changing distances

7. おわりに

太陽電池の熱暴走発生時における、シャントスポットサイズの収縮停止メカニズムに注目し、以下の5つのシミュレーションを行った。①正負帰還モデルの部分陰条件を変更したシミュレーションを行い、部分陰のサイズによらずスポット径収縮が同じ大きさで停止する現象を確認した。②電極抵抗がスポット径収縮抑制と温度低下に効果があることも明らかにした。③電気モデルと温度モデルで分け、メッシュ数を変更してシミュレーションを行うこと

で、スポット径の収縮の停止条件に付いて明らかにした。
④熱伝導率を変更してシミュレーションを行うことで、スポット径収縮の停止メカニズムを解析し、提案した簡易設計式の有効性を確認した。⑤設計式の有効性は、距離 d を変更した時にも確認できた。今後は簡易設計式の有効性を実験で評価する予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP21H01580, JST, A-STEP, JPM, JTM20G6 の支援を受けたものであり、JAXA との共同研究成果の一部である。

使用記号と値

記号	意味	値と単位
I_s	光電流	0.5 A
T_a	周囲温度	25 °C
T	レーザー照射部の温度	26 °C
H	厚さ	30.0×10^{-6} m
W	横幅	8.0×10^{-2} m
L	縦幅	3.425×10^{-2} m
ρ	密度	2330 kg/m ³
c_p	比熱	713 J/(kg·K)
f	放射率	0.9
σ	ステファンボルツマン定数	5.67×10^{-8} W/(m ² ·K ⁴)
K	シリコンの熱伝導率	168 W/(m·K)
X_{TI}	飽和電流温度指数	3
E_g	障壁電圧	4.091 eV
q_e	電荷量	1.602×10^{-19} C
K_b	ボルツマン定数	1.38×10^{-23} J/K
I_{s0}	逆方向飽和電流	0.9×10^{-54} A

参考文献

- 1) JAXA. (2022 年 9 月). 『宇宙用太陽電池の研究開発』 <http://www.kenkai.jaxa.jp/research/electrical/solarcells.html>
- 2) T. Nakamura, T. Sumita, M Imaizumi, Quantitative Evaluation of Thermal Runaway Tolerance in Space Solar Cells, Japanese Journal of Applied Physics, **57** (8), 08RD03-1-6 (2018).
- 3) R. Nosaka, N. Hamasato, T. Nakamura, I. Nanno, Proposal of Current Concentration Reproduction Model of Solar Cells for Space and Temperature Distribution Simulation, Proceedings of the Institute of Electrical Engineers of Japan Industry Application Society Conference, (Feb. 2019), 43-46, Web.
- 4) R. Nosaka, K. Murai, I. Nanno, T. Nakamura, Proposal of Design Method Using Positive / Negative Feedback Model to Prevent Thermal Runaway of Space Solar Cells, Proceedings of the Institute of Electrical Engineers of Japan Industry Application Society Conference, (Feb. 2021), 7-10, Web.
- 5) T. Nakamura, M. Imaizumi, K. Murai, R. Kawamura, I. Nanno, Thermal Runaway Generation Mechanism of Solar cell, "Next Generation Photovoltaic Power Generation System" Symposium Proceedings, (Jun. 2022), A-22, Kanazawa.
- 6) 日本機械学会, 伝熱工学, 29, (2005), 丸善出版株式会社, 東京都
- 7) K. Murai, R. Nosaka, T. Nakamura, I. Nanno, Based on the Electrode Resistance Distribution of Space Solar Cells Proposal of a Model to Predict the Effect of Current Concentration Suppression, Proceedings of the Japan Society of Solar Energy, (Nov. 2020), 65, Web.
- 8) T. Yamamoto, D. Wagi, I. Nanno, The Coupled Model for Prediction of the Temperature Distribution in a PV Cell with a Hot Spot Induced by Partial Shading, Journal of the Solar Energy Society, **45** (3), 99-104 (2019).
- 9) 南野郁夫, 熱プロセスの均一温度制御に関する研究, 54-76 (2007), [南野郁夫], 熊本県.
- 10) T. Kanazawa, A. Hatanaka, N. Kusuno, A. Misima, Thermal Analysis Technique for Printed Wiring Board Using Admittance Matrix, Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan D, **132** (1), 94-100 (2012).