

The Coupled Model for Prediction of the Temperature Distribution
in a PV Cell with a Hot Spot Induced by Partial Shading

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

Takayuki YAMAMOTO
山本 稜之¹

Daisuke WAGI
和木 大祐²

Ikuo NANNO
南野 郁夫^{3 ‡}

Abstract

Since the use of photovoltaics in the domestic and industrial sector is increasing, the reliability and safety of photovoltaic power generation systems is becoming more and more important. One of the crucial issues for safety is the formation of a hot spot, which can reach several hundred degrees Celsius in less than thirty minutes. For this reason, a fire may occur under prolonged exposure. However, a method for hot-spot detection during operation, based solely on current-voltage characteristics, has not yet been established because the detailed formation mechanism of these hot spots is different for every sample. We propose a new electro-thermal coupled model to predict the temperature distribution in a solar cell with a hot spot that is caused by a reverse bias voltage due to a local partial shade. We compare the results of the numerical simulations with experimental data and found that our coupled model can predict temperature distributions with an accuracy better than thirty degrees Celsius.

Keywords: Photovoltaics system, Hot spot, Partial shade, Reverse bias, Simulation

キーワード: 太陽光発電システム, ホットスポット, 部分陰, 逆バイアス, シミュレーション

1. はじめに

近年, 再生可能エネルギーの普及に向けて太陽光発電システムの導入が進みつつある. それに伴い, 太陽光発電システムの安全性が重要視されている⁽¹⁻³⁾. その安全性の課題の1つが, 部分陰により太陽電池セル上に発生するホットスポットである^(4, 5). このホットスポットはバイパスダイオード(BPD)が開放故障し, セルが部分的に遮光されると, 降伏電圧を超える逆方向バイアス電圧が印加され発生する. そのため, ホットスポットはどのモジュールでも発

生する可能性がある. 例えば, ホットスポットが数十分で数百°C の高温になる事例が報告されている. 従って, ホットスポットはハンダ部の溶融等を招き, 最悪の場合, 火災に繋がることを考えられる⁽⁶⁾. しかし, ホットスポットが発生する詳細なメカニズムは複雑であり, 各製品で異なるため, 動作時の電流-電圧(I-V)特性に基づいたホットスポットの再現手法が確立されていないのが現状である. 太陽電池のホットスポットのシミュレーション研究は存在するが, 予め発熱箇所と大きさを指定する必要があるため⁽⁷⁾, PV セルの I-V 特性の温度変化を考慮したホットスポットのシミュレーションができないという課題があった. そこで, 本論文では部分陰により発生したホットスポットの温度分布と発熱分布を再現する新たなモデルを提案し, PV セル上のホットスポットの危険性を再現するのに有効かを評価したので報告する.

*1 宇部工業高等専門学校 生産システム工学専攻

*2 元宇部工業高等専門学校 生産システム工学専攻

*3 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

(原稿受付: 2018年11月27日, 受理日: 2019年4月9日)

2. 連成モデル

2.1 モデルの概要

本モデルは、1セルのシリコン系太陽電池のI-V特性から発熱量を算出する電気モデルと、様々な部分陰の条件下で発熱量を基に温度分布を算出する熱モデルを組み合わせた連成モデルである。温度が電気モデルにフィードバックされるため、セルの温度特性と電気特性の両方を含むモデルとして構成される。ここで、1セルはメッシュ(mesh)内の電気、熱の連成解析を行うことによる処理の重さを考慮し、各層を12×12の144個、3層で $n = 432$ 個のメッシュに分割し、物理量を n 行1列のベクトルとする。モデルの入力は、各メッシュの日射強度 H (n 行1列の行列)とセルに流入する電流 I_{in} である。モデルの出力は、隣接するメッシュとの熱干渉等から各メッシュの温度の行列で算出される温度分布である。なお、本モデルの作製にはMATLAB/Simulinkを用いた。Fig. 1に連成モデル内処理のブロック線図、Fig. 2にセルの構造を示す。本モデルでは簡略化のため、太陽電池のインタコネクタ(interconnector)やフィンガー電極(electrode fingers)を省略している。

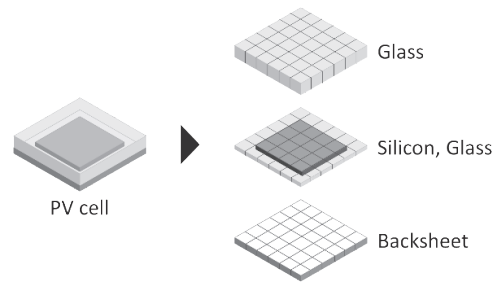


Fig. 2 Schematic of PV cell structure.

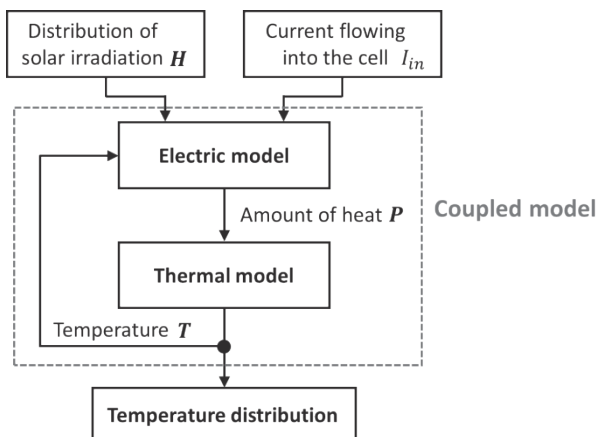


Fig. 1 Block diagram of the coupled model.

2.2 電気モデル

Fig. 3に電気モデルの概略図を示す。電気モデルは、最初に日射強度 H を基に各メッシュに生じた光電流 I_{ph} (ベクトル)を算出する。ここで、 I_{pm} はセルの定格電流、 N はシリコン部の分割数である。次に I_{ph} の合計値 I_{ph} とセルに流入する電流 I_{in} (スカラー)との差を取り、逆電圧により発生する電流を算出する。そしてFig. 3の2-D Lookup Table 1でこの電流差とシリコン部の平均温度 T_{Si} からシリコン部に印加される電圧 V を式(1)を基に算出する。

$$V = LUT1(T_{Si}, I_{in} - I_{ph}) \quad (1)$$

次に、算出した電圧 V と HH (n 行1列)とを乗算する。 HH は1(シリコン部)と0(その他)により構成され、この計算により電圧の生じる部分を指定する。その後2-D Lookup Table 2でシリコン部に印加される電圧 V と全メッシュの温度 T から逆電圧で生じた各メッシュの電流 I_B を式(2)より算出し、光電流 I_{ph} を加算し、各メッシュに流れる電流 I を算出する。

$$I_B = LUT2(T, V) \quad (2)$$

$$I = I_{ph} + I_B \quad (3)$$

最後に全メッシュの発熱量 P (ベクトル)を式(4)より算出し、熱モデルに出力する。

$$P = V \cdot I \quad (4)$$

なお、モデルの簡易化のため、各2-D Lookup TableにはFig. 4に示すようにセルのI-V特性を曲線から折れ線に近似したものを数値で入力している。また、この電気モデルには降伏電圧の温度特性(-30[mV/K])を用いている。Table 1, Table 2にFig. 3中の各2-D Lookup Tableの値を示す。

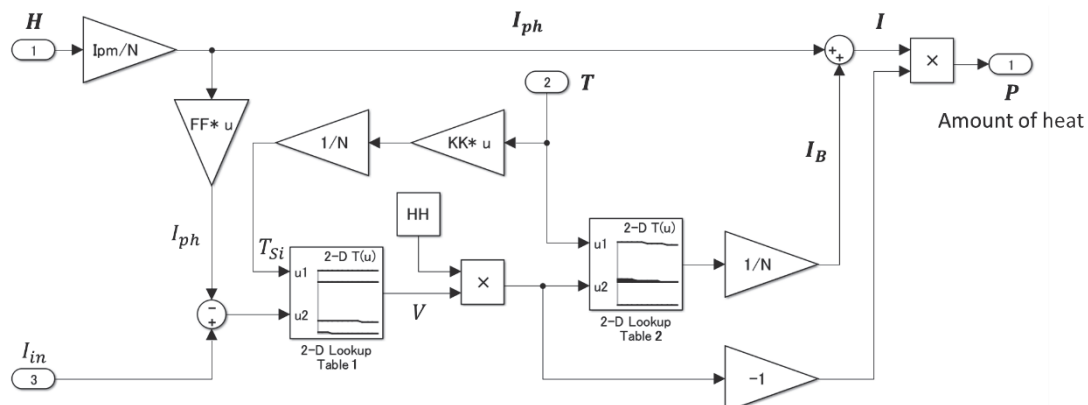


Fig. 3 Structure of electric model.

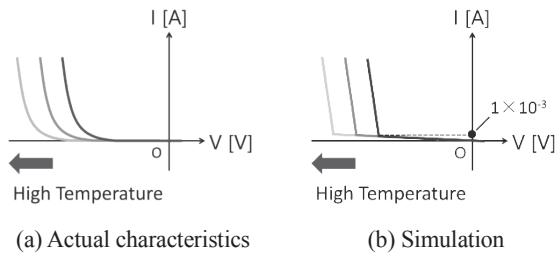


Fig. 4 Linear approximation of I-V characteristic.

Table 1 Contents of 2-D Lookup Table 1

		u2 ($I_{in} - I_{ph}$)				
		-14	-0.001	0	0.001	14
u1 (T_{Si})	25	10.5	0.5	0	-25.8	-35.8
	125	10.5	0.5	0	-26.1	-36.1
	225	10.5	0.5	0	-26.4	-36.4
	325	10.5	0.5	0	-26.7	-36.7

Table 2 Contents of 2-D Lookup Table 2

		u2 (V)					
		-26.7	...	-25.8	0	0.5	10.5
u1 (T)	25	1.26	...	0.001	0	-0.001	-14
	125	0.84	...	0.000989	0	-0.001	-14
	225	0.42	...	0.000977	0	-0.001	-14
	325	0.001	...	0.000966	0	-0.001	-14

ここで、Table 1 の表側はシリコン部の平均温度 T_{Si} 、表頭は流入電流と日光照射で生じた電流との差 $I_{in} - I_{ph}$ であり、この2つの要素から対応する電圧 V を出力する。また、Table 2 の表側は全メッシュの温度 T 、表頭はシリコン部に印加される電圧 V であり、同様に逆電圧で生じた各メッシュの電流 I_B を出力する。

2.3 熱モデル

Fig. 5 に熱モデルの構造、Fig. 6 に熱移動の詳細及びPVセルの物性値を示す⁽⁹⁾。この熱モデルは、温度差モデル⁽¹⁰⁾、アドミタンス(admittance)行列モデル⁽¹²⁾を基に作製された。熱モデルは、エネルギー保存則に基づき、メッシュ間の熱流を計算する熱伝導フィードバックと、メッシュから空気への熱流を計算する熱伝達フィードバックと熱輻射フィードバック、各メッシュの熱容量の逆数を配列した行列 $1/E$ 、積分要素から成り立っている。このモデルは、まず発熱量 $P (= [P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n]^T)$ と、熱伝導・熱伝達・熱輻射の3つの値の合計からなる熱流ベクトルの差を計算する。この熱流の差に行列 $1/E$ を掛け、積分することで、各メッシュの温度を算出する。ここで、熱伝導、熱伝達、熱輻射はそれぞれ式(5)~(7)に示すフーリエ(Fourier)の法則、ニュートン(Newton)の冷却の法則、ステファン・ボルツマン(Stefan-Boltzmann)の法則に基づき、式(8)~(10)の計算を行っている。

・熱伝導

$$Q_d = A\lambda \frac{T_i - T_j}{d} \quad (5)$$

・熱伝達

$$Q_v = A_S h(T_i - T_\infty) \quad (6)$$

・熱輻射

$$Q_r = A_S \epsilon \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (7)$$

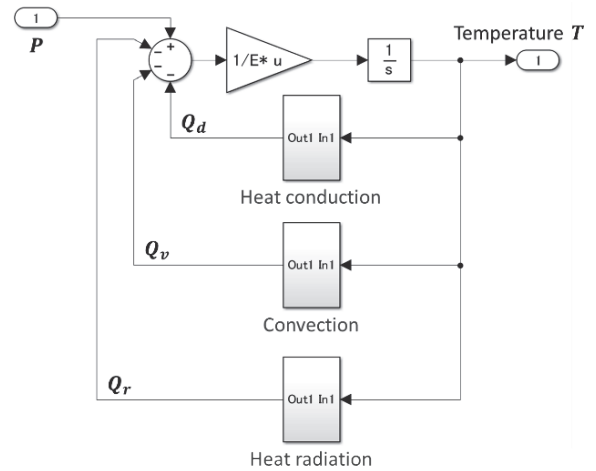


Fig. 5 Structure of thermal model.

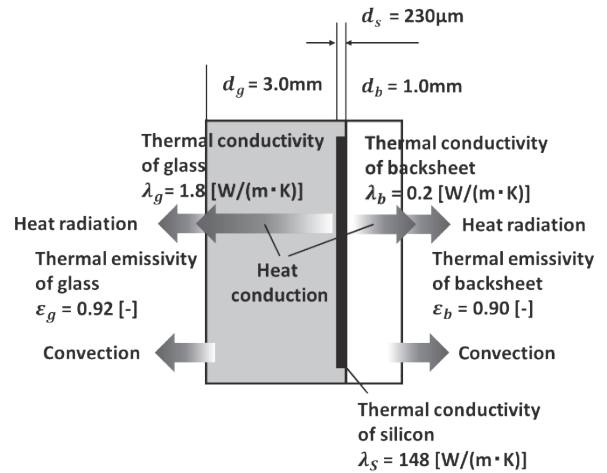


Fig. 6 Heat transport in the PV cell.

・熱伝導

$$\begin{bmatrix} Q_{d1} \\ Q_{d2} \\ \vdots \\ Q_{dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{d1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{d2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

・熱伝達

$$\begin{bmatrix} Q_{v1} \\ Q_{v2} \\ \vdots \\ Q_{vn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{v1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{v2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{vn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 - T_\infty \\ T_2 - T_\infty \\ \vdots \\ T_n - T_\infty \end{bmatrix} \quad (9)$$

・熱輻射

$$\begin{bmatrix} Q_{r1} \\ Q_{r2} \\ \vdots \\ Q_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{r1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{r2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{rn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^4 - T_\infty^4 \\ T_2^4 - T_\infty^4 \\ \vdots \\ T_n^4 - T_\infty^4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ただし、今回のシミュレーションにおいて熱伝達率 h は固定値かつどのメッシュも同じ値だとする。使用した記号は最後にまとめて示す。また、上記のアドミタンスの値 Y_{dn} , Y_{vn} , Y_{rn} は下式(11)~(13)で算出する。

$$Y_{dn} = \frac{A \cdot \lambda}{d} \quad (11)$$

$$Y_{vn} = A_S \cdot h \quad (12)$$

$$Y_{rn} = A_S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \quad (13)$$

今回のシミュレーションではPVセルが薄いことを考慮し、側面部からの熱伝達、熱輻射を無視している。また、式(12), (13)は熱伝達、熱輻射の境界条件を示す。側面部の境界条件については周囲温度を使用する。熱容量の逆数を配列した行列 $1/E$ の構成を次に示す。

$$\frac{1}{E} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{E_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{E_n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここで、各メッシュの熱容量 E_i は次式で求める。

$$E_i = c_i \rho_i V_i \quad (i = 1 \sim n) \quad (15)$$

3. 実験との比較

3.1 94%陰のホットスポット実験

この実験では、モジュール3枚（各25枚のセル）と単セルモジュールを直列に接続し、単セルモジュールの左上角（面積比約6%）を除いて段ボールにより遮光させることで、降伏電圧を超える逆方向バイアス電圧と3枚のモジュールによる電流により、照射部にホットスポットを発生させた⁽⁸⁾。モジュール1枚の公称開放電圧は16.1[V]、単セルモジュールの降伏電圧は-25.8[V]、最大出力電流は8.57[A]、降伏電圧以上での電流変化は1.4[A/V]で、実験時間は1500[s]（25分）、実験時の気温は25[°C]程度であり、日射強度は1[kW/m²]程度と非常に安定していた。Table 3にこれらの実験の検証に使用した各パラメータ、Fig. 7に実験時の単セルモジュールの熱電対による温度の測定点を示す。層の材質や熱移動の方向に応じて式(11)の A にTable 1に示す A_{th} , A_{sg} , A_g , A_{ba} の値を代入している。

このシミュレーションの初期条件は、流入電流 I_{in} が6.4[A]⁽⁸⁾、日射分布は照射部のシリコン部が1[kW/m²]、それ以外が0[kW/m²]である。また、各メッシュの初期温度は25[°C]とした。また、遮光部はマスクとの隙間で断熱の可能性もあるが、遮光マスク表面からの熱移動があるため、

熱伝達・熱輻射の値は他の部分と同一とした。

Table 3 The parameters used in the simulation

Symbol	Value
n	12×12×3 [-]
A_S, A_{th}	2.43×10 ⁻⁴ [m ²]
A_{sg}	3.12×10 ⁻⁶ [m ²]
A_g	4.99×10 ⁻⁵ [m ²]
A_{ba}	1.56×10 ⁻⁵ [m ²]
h	10.0 [W/(m ² · K)]
T_∞	298 [K]

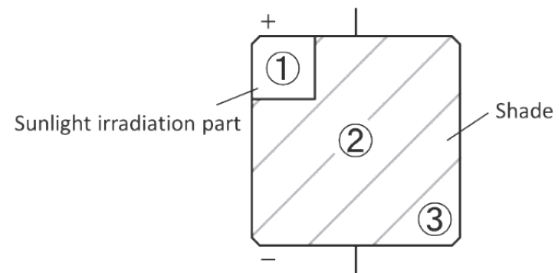


Fig. 7 The three-temperature measurement point on the cell.

Fig. 8に周囲温度に対する温度上昇の実験とシミュレーションの比較、Fig. 9 (a)及び(b)に実験とシミュレーションの温度分布、(c)に発熱分布を示す。Fig. 8より、発熱部のシミュレーションの誤差が15°C以内となっていることがわかる。さらに、Fig. 9より、太陽光照射部が最も高温で、その地点から遠ざかるにつれ温度がゆるやかに低下している様子や、シリコン部周辺のガラスによって断熱されている様子が再現できていることがわかる。誤差15°Cは火災に繋がる高温ホットスポットの数100°Cに比べ十分小さい値である。また、Fig. 9 (c)に示すように発熱分布もPVセル上の発熱箇所と大きさの指定を必要とせず出力を得ることができる。この発熱分布はFig. 1内の電気モデルから熱モデルに受け渡す1メッシュ当たりの P [W]である。

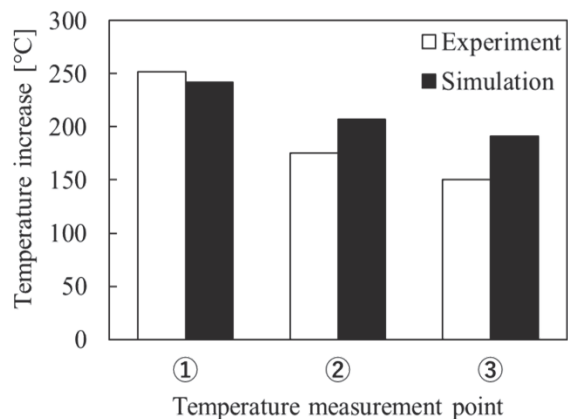


Fig. 8 Temperature increase relative to the ambient temperature.

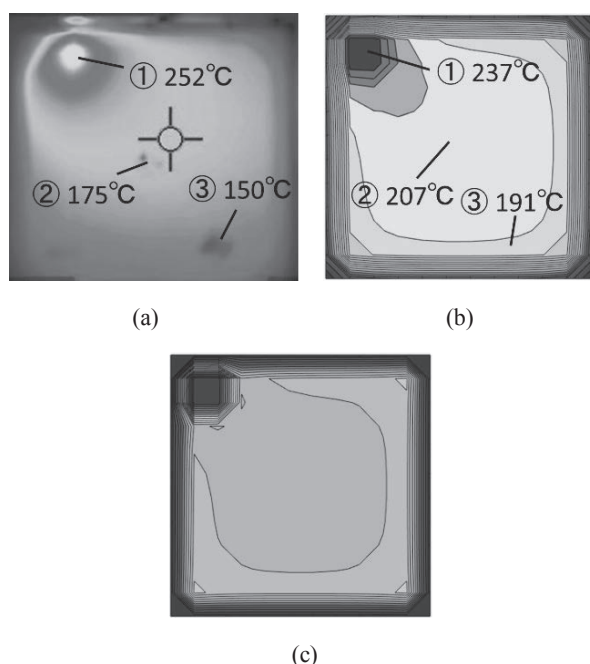


Fig. 9 (a) Comparison between the thermal image recorded with an infrared camera and (b) the calculated temperature distribution of the bottom layer (backsheet) and (c) the calculated power density distribution.

3.2 50%陰のホットスポット実験

この実験では、3.1節の実験に対し遮光面積を単セルモジュールの50[%]とした。この実験の単セルモジュールには、最大出力動作電流がそれぞれ8.65[A]と8.57[A]、降伏電圧がそれぞれ-32.0[V]と-25.8[V]、降伏電圧以上の電流変化がどちらも2.54[A/V]の2枚のPVセルを使用した。実験時間は150[s]、実験時の気温は30[°C]程度、日射強度は0.80~0.95[kW/m²]である⁽⁸⁾。その他の各パラメータは3.1節と同じである。

このシミュレーションの初期条件は、日射分布がシリコン部では実験時の平均値0.875[kW/m²]、それ以外が0[kW/m²]で、各メッシュの初期温度は30[°C]である。なお、この検証でも熱伝達・熱輻射の値は他の部分と同一としている。Fig. 10に最高温度部における実験とシミュレーションの周囲温度に対する温度上昇、Fig. 11、Fig. 12に実験、シミュレーションの温度分布を示す。Fig. 10より作製したモデルによる手法は実測値との誤差が25°C以内となっていることがわかる。また、Fig. 11とFig. 12より太陽光照射部が最も高温で、その地点から遠ざかるにつれて温度がゆるやかに低下している様子や、シリコン部周辺のガラスによって断熱されている様子が再現できており、降伏電圧が大きいPVセルの方が高温となった状態が再現できていることが分かる。以上のことから、モデルはホットスポットの再現性として十分な精度を有することが確認できた。温度誤差の要因は、モデルでは周囲気体への熱伝達を全表面で均一としたため、実際の熱流の広がりや異なったことや、熱伝達率の温度依存特性を省略したこと、側面部から

の放熱を無視したことによる熱の流れの簡略化、メッシュの粗さの影響だと考える。

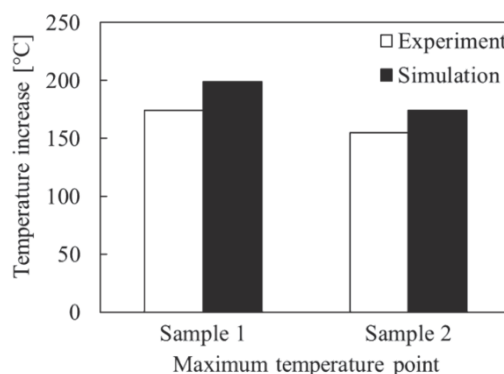


Fig. 10 Temperature increase relative to the ambient temperature.

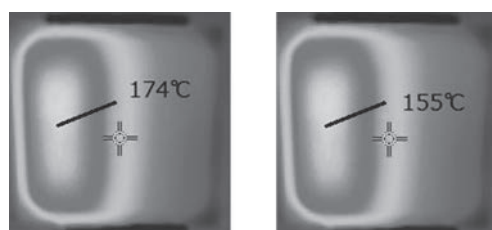


Fig. 11 Thermal images of two samples.

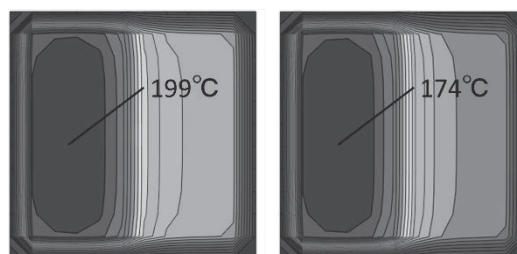


Fig. 12 Calculated temperature distribution of two samples.

4. おわりに

今回の研究では、BPD開放故障時に部分陰が発生したことによる逆バイアス印加が原因で発生したホットスポットの温度分布を再現する連成モデルを提案し、これを用いて実験データとの比較を行った。2つの実験のシミュレーションでモデルの出力は、実験データに近い温度上昇量を得ることができ、発熱部の精度はいずれも25°C以内であることを確認した。誤差は10%以上あるものの、高温域では熱輻射が支配的になるため、より高温なホットスポットのシミュレーションでは誤差が小さくなると思われる。また、温度分布では発熱部から遠ざかるにつれて温度がゆるやかに低下する様子やシリコン部周辺のガラスによって断熱されている様子を再現することができた。このことから、連成モデルは1セルのシリコン系太陽電池の高温による

危険性の再現が可能であることが確認でき、今まで課題となっていた PV セルの I-V 特性の温度変化を考慮したシミュレーションにより発熱分布を得ることもできた。PV セルの I-V 特性の簡略化により誤差要因が増えているものの、ホットスポット再現において高温時の誤差が増えた場合でも PV セルの危険性を再現するには十分有効であると考えられる。本モデルはシリコン部に印加される電圧 V の算出にシリコン部の平均温度を使用しているが、実際はシリコン部全体で温度差が生じるため、モデルの改善が今後の課題である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K13935, 17K06331 の助成を受けたものである。

使用記号

Q_d, Q_{dn}	: 熱伝導による熱流	[W]
Q_v, Q_{vn}	: 熱伝達による熱流	[W]
Q_r, Q_{rn}	: 熱輻射による熱流	[W]
Y_{dn}	: 熱伝導の熱抵抗の逆数	[W/K]
Y_{vn}	: 熱伝達の熱抵抗の逆数	[W/K]
Y_{rn}	: 熱輻射の熱抵抗の逆数	[W/K ⁴]
T_i, T_j, T_n	: メッシュの温度	[K]
T_∞	: 周囲温度	[K]
λ	: 熱伝導率	[K]
A	: メッシュの断面積	[m ²]
A_{sg}	: メッシュの断面積 (水平・鉛直方向, シリコン・ガラス部)	[m ²]
A_g	: メッシュの断面積 (水平・鉛直方向, ガラス部)	[m ²]
A_{ba}	: メッシュの断面積 (水平・鉛直方向, バックシート部)	[m ²]
A_{th}	: メッシュの断面積 (厚さ方向)	[m ²]
A_s	: メッシュの表面積	[m ²]
d	: 距離	[m]
h	: 熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
ε	: 放射率	[-]
σ	: ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10 ⁻⁸)	[W/(m ² ·K ⁴)]
c	: 比熱	[J/(kg·K)]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
V	: メッシュの体積	[m ³]

参考文献

1) D. Stellbogen, Use of PV circuit simulation for fault detection in PV array fields, 23rd IEEE PVSC (1993), 1302-1307, Louisville, KY, USA.

2) S. Chu, A. Majumdar, Opportunities and challenges for a sustainable energy future, *Nature*, **488** (8), 294-303 (2012).

3) N. G. Dhere, N. S. Shiradkar, Fire hazard and other safety concerns of photovoltaic systems, *Journal of Photonics for Energy*, **2** (1), 1-13 (2012).

4) S. Kurtz, N. Haegel, R. Sinton, R. Margoils, The future of photonics, *Nature Photonics*, **11** (1), 3-5 (2017).

5) W. He, F. Liu, J. Ji, S. Zhang, H. Chen, Safety Analysis of Solar Module under Partial Shading, *International Journal of Photoenergy*, **2015** (2), 1-8 (2015).

6) K. Okada, S. Yamanaka, D. Iioka, H. Ohno and H. Kawamura, An investigation into hot-spot in PV module, JSES/JWEA Joint Conference (Nov. 2010), 535-538, Koriyama, Fukushima.

7) I. Geisemeyer, F. Fertig, W. Warta, S. Rein, M. C. Schubert, Prediction of silicon PV module temperature for hot spots and worst case partial shading situations using spatially resolved lock-in thermography, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **120** (1), 259-269 (2014).

8) K. Yamashita and I. Nanno, Electric and temperature characteristic in a hot spot in PV module, JSES/JWEA Joint Conference (Nov. 2015), 93-96, Miyazaki, Miyazaki.

9) K. Kawagoe, Y. Hishikawa and N. Yamada, Feasibility study of Outdoor STC performance evaluation of photovoltaic modules based on sun shading technique, JSES/JWEA Joint Conference (Nov. 2016), 33-36, Matsuyama, Ehime.

10) I. Nanno, N. Matsunaga and S. Kawaji, Feedback type model of thermal system and its application to noninterference control, *Journal of the Institute of Electrical Engineers*, **127** (12), 373-379 (2007).

11) I. Nanno, Study of Uniform Temperature Control for Thermal Process, Ph.D. Thesis, 63 (2007), (Nov. 2018).
<http://reposit.lib.kumamoto-u.ac.jp/bitstream/2298/11059/3/24-0359.pdf>

12) M. N. Sabry, Compact thermal models for electronic systems, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **26** (3), 179-185 (2003).