

# 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

会員 ○松川 洋 (東京農工大学)

会員 黒川 浩助 (東京農工大学)

## Temperature fluctuation analysis of Photovoltaic Modules at short time interval

Hiroshi MATSUKAWA† and Kosuke KUROKAWA

Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT)  
2-24-16 Naka-cho, Koganei-city, Tokyo, 184-8588, JAPAN  
Tel. & FAX: +81-42-388-7445

E-mail: hmatsu@cc.tuat.ac.jp

†: Also belong to the RTS Corporation

### Abstract

PV array temperature and ambient temperature change constantly, and the current of the array is influenced by change of the irradiation and the temperature. However, many papers described the model which estimated PV module temperature dealt with it as static and hourly value. In order to monitor the temperature in a second level interval we have established experimental equipment that can monitor the temperature on the second time interval scale. This paper presents that the estimated fluctuation of the PV module temperature using a heat transfer model, and demonstrates that PV module temperature influences the output voltage at a short time interval.

キーワード： 太陽電池モジュール, 温度上昇, シミュレーション

Keywords: PV module, Temperature rise, Simulation

### 1. はじめに

屋外に設置された太陽電池モジュールの温度は、太陽からの放射や周囲温度、風速、周囲への放射などにより常に変動している。太陽電池モジュールの変換効率は温度の影響を大きく受け、温度係数は $-0.4 \sim -0.5$  ( $\%/^{\circ}\text{C}$ )程度と大きく、温度上昇による発電出力の低下は無視できない。これまでに筆者らは、太陽電池模擬電源を開発<sup>[1]</sup>し、太陽電池モジュール (又はアレイ) の出力電圧変動が急速に変動する場合、インバータの最大電力点追従 (MPPT) 制御が困難になる可能性を示してきた<sup>[2]</sup>。MPPT制御法の開発や正確な評価のためには、短い時間

間隔での太陽電池モジュールの出力変動状況を掴んでおくことが欠かせない。太陽電池モジュールの電圧は一般にセル温度に依存することから、短時間での温度変動状況を知る必要がある。

太陽電池モジュール温度推定に関する研究は、以前から関心の高いテーマであり、数多くの文献を見かける。湯川氏らは、フィールドでの測定データを基に伝熱工学の知見を利用して太陽電池アレイの温度推定式を確立した<sup>[3]</sup>。西川氏は、実証試験設備を用いた実験結果からスタンド・オフ (Stand-off) 方式アレイの温度推定式を求めている<sup>[4]</sup>。赤木氏らは太陽光発電システムの実測結果から、回帰分析により太陽電池セル温度の影響を評価した<sup>[5]</sup>。D. L. King氏らは、様々な太陽電池モジュールの測定結果から、日射量と太陽電池モジュール温度上昇の関係を明確にした<sup>[6]</sup>。A. D. Jones氏らは、気象条件が不安定な際の太陽電池モジュールの温度変動について明らかにした<sup>[7]</sup>。これらの温度推定モデルは、太陽電池モジュール温度が定常状態である1時間値では比較的精度の高い推定が可能である。しかし、短い時間間隔での、いわゆる非定常状態における温度推定には適していない。そのため、本研究では短時間間隔における太陽電池モジュールの温度変動について、シミュレーション・モデルを構築し実験値との検証を行った。

### 2. 温度推定モデル

図1に本研究における温度推定モデルの概要を示す。

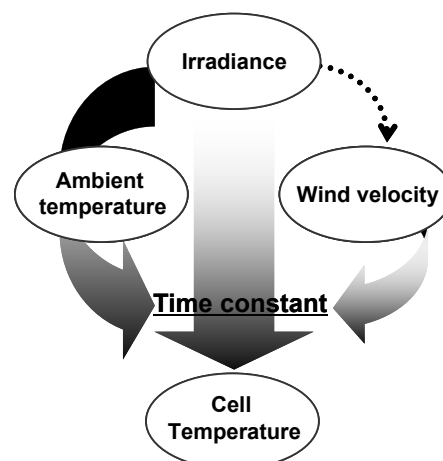


図1 温度推定モデルのイメージ

Fig.1 Image of the PV module temperature simulation model

太陽電池モジュールの温度は、日射強度及び日射の影響を受ける周囲温度、風速に依存し、ある時定数を持ってセル温度に反映される。本研究では、日射強度、周囲温度、風速、1ステップ前の太陽電池モジュール温度から定常状態における「目標温度」を推定し、その温度に到達するまでの温度時定数を求め、過渡解析により非定常状態における太陽電池モジュール温度を推定している。

## 2.1 定常熱伝導による推定

太陽電池モジュールからの熱放射及び熱伝達を考慮し、定常状態におけるモジュールの温度推定法を検討した。図2に太陽電池モジュールの熱伝導モデルを示す。

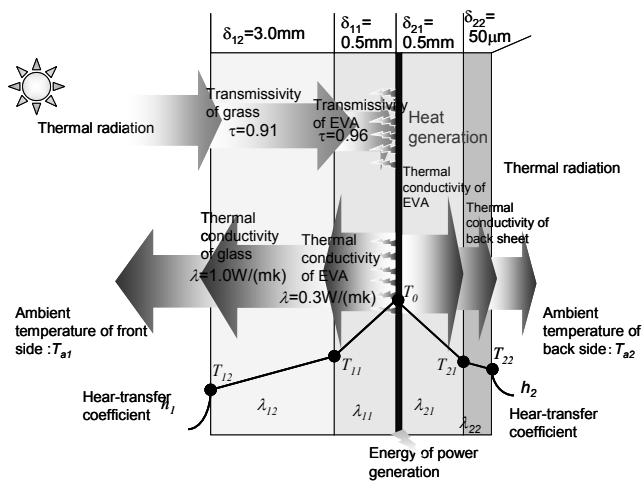


図2 太陽電池モジュールの熱伝導モデル  
Fig.2 Thermal conduction model of PV module

太陽電池モジュールの熱収支から定常状態では、日射から得られるエネルギーと、発電による電気エネルギー及び大気への熱伝達、天空や周囲の物体への放射のエネルギーの和は等しいと考えられる。モジュールは表裏の構造が大きく異なることから、風による影響が支配的となる面について、モジュールの表面と裏面に分けて検討した。

・表面への風が支配的となる場合の熱伝達：

$$G_A \cdot (1 - \eta) \cdot \varepsilon_1 = \frac{T_0 - T_a}{\frac{\delta_{11}}{\lambda_{11}} + \frac{\delta_{12}}{\lambda_{12}} + \frac{1}{h_1}} + \sigma \varepsilon_2 (T_0^4 - T_a^4) \quad (1)$$

・裏面への風が支配的となる場合の熱伝達：

$$G_A \cdot (1 - \eta) \cdot \varepsilon_1 = \frac{T_0 - T_a}{\frac{\delta_{21}}{\lambda_{21}} + \frac{\delta_{22}}{\lambda_{22}} + \frac{1}{h_2}} + \sigma \varepsilon_2 (T_0^4 - T_a^4) \quad (2)$$

・熱伝達率の算出：

$$h = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (3)$$

ここで、

$G_A$ ：日射強度  
 $\varepsilon_1$ ：ガラスの透過率  
 $T_0$ ：セル温度  
 $\delta_{11}$ ：EVAの厚さ  
 $\delta_{12}$ ：ガラスの厚さ  
 $\delta_{21}$ ：EVAの厚さ  
 $\delta_{22}$ ：バックシートの厚さ  
 $\lambda_{21}$ ：バックシートの熱伝導率  
 $\sigma$ ：ボルツマン定数  
 $d$ ：先端からの距離

$\eta$ ：モジュール変換効率  
 $\varepsilon_2$ ：輻射率  
 $T_a$ ：周囲温度  
 $\lambda_{11}$ ：EVAの熱伝導率  
 $\lambda_{12}$ ：ガラスの熱伝導率  
 $\lambda_{21}$ ：EVAの熱伝導率  
 $Nu$ ：ヌセルト数

## 2.2 非定常熱伝導による推定

前項で求めた定常状態における目標温度に到達するまでの過程を「集中熱容量法」によって求める<sup>[8]</sup>。

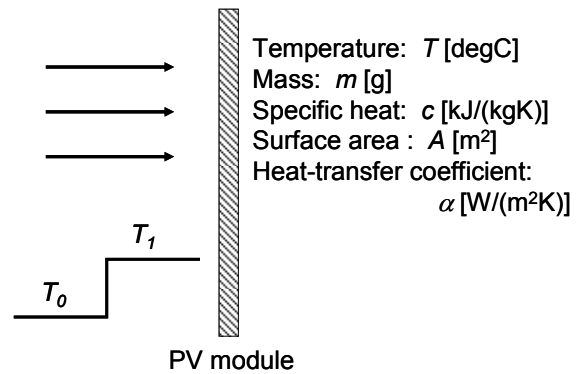


図3 集中熱容量法による非定常熱伝導モデル  
Fig.3 Transient heat conduction model using point heat capacitance method

定常な流れの大気中に置かれた表面積 $A$ 、質量 $m$ 、比熱 $c$ のモジュールにおいて、当初は、モジュールの温度も周囲温度 $T_0$ に等しくなっている。周囲温度が $T_0$ から $T_1$ にステップ状に変化したとすると、モジュール温度の応答（時間的変化）を求める。モジュールの熱伝導率 $k$ が十分に大きいとすると、モジュール内の温度分布は一樣とみなすことができ、温度は時間のみの関数と考えることができる。過渡状態中のある時刻におけるモジュールの温度を $T$ とすると、微小時間 $d\tau$ 間に大気からモジュールに伝達される熱量は、熱伝達率 $\alpha$ とすれば、

$$\alpha A (T_1 - T) d\tau \quad (4)$$

これはモジュールに蓄えられるエネルギー  $mcdT$  に等しい。すなわち、

$$\alpha A(T_1 - T)d\tau = mc dT \quad (5)$$

とおける。ただし、 $dT$ はこの間のモジュールの温度上昇である。

ここで、 $dT = -d(T_1 - T)$ とおけるため、

$$\frac{d(T_1 - T)}{T_1 - T} = -\frac{\alpha A}{mc} d\tau \quad (6)$$

この式を積分すると

$$\therefore \ln\left(\frac{T_1 - T}{T_1 - T_0}\right) = -\frac{\alpha A}{mc} \tau \quad (7)$$

ここで、 $\tau_c = \frac{mc}{\alpha A}$  は系の時定数となる。そのため、

温度応答は以下のように表すことができる。

$$T(\tau) = T_1 - (T_1 - T_0)e^{-\frac{\alpha A}{mc}\tau} \quad (8)$$

本手法を用いることで、非定常熱伝導解析で頻繁に用いられる有限要素法などに依らず、簡易かつ精度の高い推定が可能となる。

### 3. 実験概要

シミュレーションモデルの精度検証のために、屋内と屋外でそれぞれ実験を行った。

#### 3.1 屋内実験

太陽電池モジュールの温度変化の状況を明確にするために屋内において実験を行った。屋内実験では、直流電源を用いてモジュールに電力を供給することで加熱し、モジュール温度が安定した後に電源供給を止め、温度が安定するまで冷却させた。また、「無風」及び送風機からの風量を「弱風」、「中風」、「強風」の4段階に設定しモジュール温度変化を測定した。さらに、放射伝熱の影響を避けるため暗所で測定を行い、送風機以外の大気対流が発生しないよう努めた。屋内実験の概要を図4に示す。

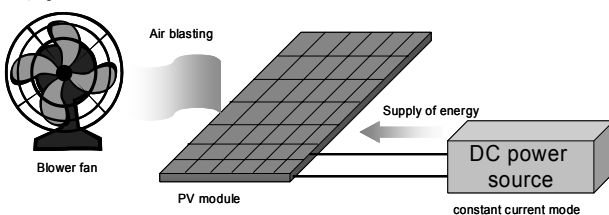


図4 屋内実験の概要

Fig.4 Overview of the indoor experiment

#### 3.2 屋外実験

太陽電池モジュールの実際の温度変動を明らかにするために、太陽電池モジュールを屋外暴露し測定を行った。

日射の測定は、熱式日射計の利用では応答速度に遅延が生じるため、小型の参照セルを用いた。低風速時におけるモジュール温度の変動が重要となるため、風速計は、起動風速が0.2 [m/s]である微風速計を用いた。太陽電池モジュール温度は、モジュール中央部裏面のバックシートを剥離し、熱電対でセル温度を測定した。大気温度も熱電対で測定した。温度測定の参照値として太陽電池モジュールの開放電圧も測定した。全てのデータは屋内実験と同様に1秒間隔で測定した。屋外実験の概要を図5に示す。

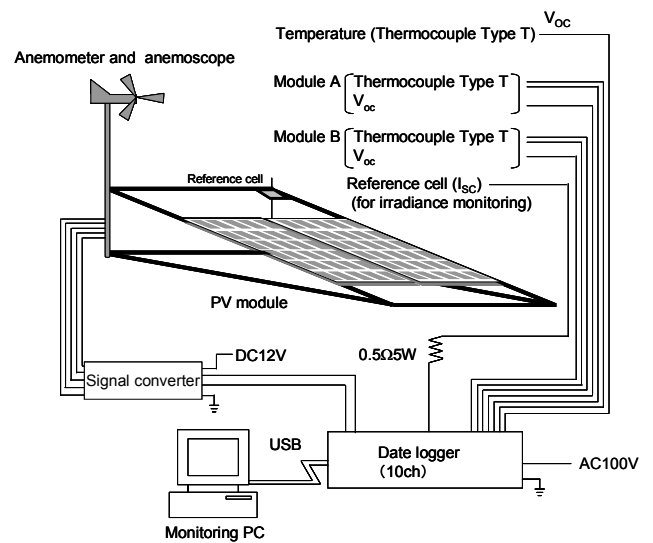


図5 屋外実験の概要

Fig.5 Overview of the outdoor experiment

### 4. 結果

屋内実験における結果を図6に示す。

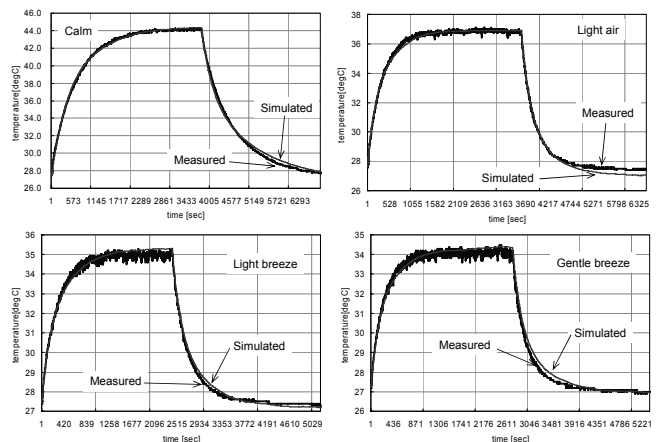


図6 屋内実験における実験結果

Fig.6 Experimental result at the indoor experiment

屋内実験では、表面及び裏面から送風し、それぞれの状態で推定精度が向上するよう推定モデルを最適化した。

そのため、図6に示すように精度の高い推定モデルを策定することができた。なお、実験値と推定値は二乗平均誤差 (RMSE) を用いて評価した。

次に、屋外実験データを用いて推定モデルの検証を行った。図7は、2004年3月28日におけるシミュレーションと実測値の比較結果である。参考のために、大気温度、日射強度、風速のデータを掲載した。高い精度で推定できていることが分かる。

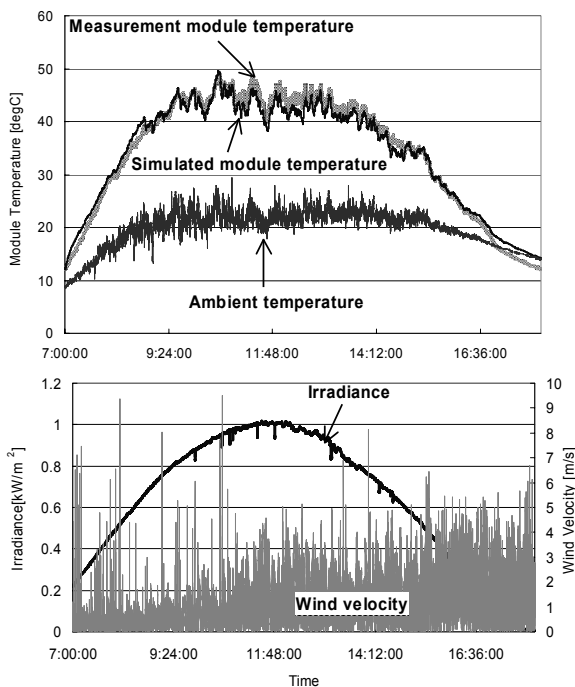


図7 実験データと推定値との比較 (2004年3月28日)  
Fig.7 Compare of the measurement and simulated data (March 28, 2004)

図8には、年間データを用いた実験結果のRMSEを示す。欠測値が多いため全ての評価はできないが、概ね1年を通じて高い精度での推定が可能であることが分かり、本推定手法は年間データにとっても有効な手法であることが確認できた。

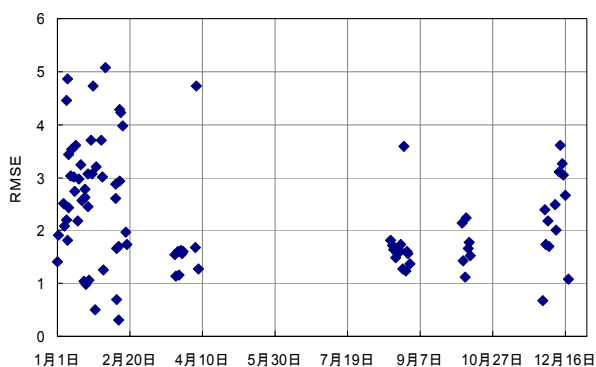


図8 年間を通じた推定値の二乗平均誤差 (RMSE)  
Fig.8 RMSE of the simulated data through the year

## 5. まとめ

本研究では、1秒という短い時間間隔における太陽電池モジュールの温度特性を明らかにし、伝熱計算による手法を利用して、太陽電池モジュールの動的な温度変動を精度高く推定する手法を確立した。本手法は、今後太陽光発電システムのシミュレーションに組み込むことで、システム全体の高精度な出力推定が可能になると思われる。

## 参考文献

- [1] 奥石浩吉, 松川洋, 黒川浩助, 濱田正泰, 劉波 : 「太陽電池模擬電源による最大電力点追従制御の評価」, 平成13年電気学会全国大会講演論文集, No.7-151 (2001)
- [2] H. Matsukawa et al., “Dynamic Evaluation of Maximum Power Point Tracking Operation with PV Array Simulator”, PVSEC-12, pp.415-416 (2001)
- [3] M. Yukawa et al., “Estimation of Photovoltaic Module Temperature Rise”, IEEJ Trans. PE, Vol.116, No.9, pp.1101-1109 (1996) (in Japanese)
- [4] S. Nishikawa, “Characteristics of PV Cell Temperature and Cooling Effect on A Stand-Off Type PV Array” Journal of JSES, Vol.23, No.1, pp52-59 (1997) (in Japanese)
- [5] 赤木貴, 森山正和, 芝池英樹, 竹林英樹 : 「太陽光発電システム発電量の予測方法における太陽電池セル温度の影響に関する研究」, 平成13年度日本建築学会近畿支部研究報告集, pp1-4 (2001)
- [6] D. L. King et al., “Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties, and Results”, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (1997)
- [7] A. D. Jones et al., “A Thermal Model for Photovoltaic Systems”, Solar Energy, Vol.70, No.4, pp349-359 (2001)
- [8] 例えば, 村田章, 望月貞成 : 「伝熱工学の基礎」, 日新出版, (1994)