

## 太陽光発電システムの発電出力評価方法の考察 (太陽電池モジュール温度推定方法を中心として)

大石 紀夫

### 太陽光発電システムの 発電出力評価方法の考察

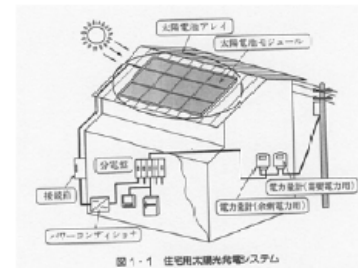
太陽電池モジュール  
温度推定方法を中心として  
2010年10月4日  
日本機械学会関西支部シニア会  
大石紀夫

### 配布資料ご説明

- (1)パワーポイント スライド抜粋
- (2)学会発表レジュメ (2ページ)  
電気学会 平成17年 電力エネルギー部門大会での発表予稿  
平成17年(2005年)8月12日 大阪大学
- (3) 同上補足資料(セッション会場で配布)  
(1ページ)

### 太陽光発電システム

出典:太陽光発電システムの設計と施工(オーム社)



### 発電出力特性

- 太陽電池出力は 資料(3)式で表される
- すなわち、出力は日射強度に比例するとともに、温度上昇1度に対して、約0.5%低下する
- 市販モジュールは、温度 25°C、日射強度 1000 W/m<sup>2</sup> での出力が仕様値として保証されている

### 発電出力特性

- 太陽電池モジュール(またはアレイ)を、ある地点に設置した場合、一年間でどれだけの発電量が期待できるか？

### 地域別発電量予測図の短所

- 戸建て住宅設置用であれば、家電品感覚でこの図を参照し、発電量を予測するのに便利である
- 大規模発電用に設置者が、設置地点の日射強度・気温・風速データ等を用いて、発電量予測、すなわち収益計算を行うのには(この図は)適していない

### PTC法(米国Sandia研究所提案)

- 太陽光発電システムの屋外曝露データを統計処理し、予稿(1)式の回帰係数A,B,C,Dを求めて出力を評価する方法
- 2005年の段階で、米国を含む海外において出力評価式として認知されていたが、日本国内では、あまり知られず、また実測データ事例も少なかった

### (3)式と(1)式の関係

- Sandia研究所の原論文は、(1)式で太陽光発電出力を評価できる理由を説明していない
- 太陽電池モジュール出力特性(3)式からの誘導方法を述べたのが、電気学会発表の主旨

### 太陽電池モジュール温度特性

- 太陽電池モジュール温度  $T$  は、日射強度が強ければ高く、風速が強ければ低下する
- 周囲温度を基準とし、これらの関係が線形であるという(4)式を仮定すると、(3)式は(5)式の形となり、(2)式に対応する式が得られる
- (2)式は(1)式の記号を書き換えたものである

### 線形仮定の妥当性検討

- (4)式の線形仮定を、熱工学理論から求められる数値計算結果と対比し、妥当性を検討した(予稿 3章の内容)
- 熱工学理論式は「新太陽エネルギー利用ハンドブック」(日本太陽エネルギー学会発行)記載のものを利用した

### 検討対象

- 対象とする太陽光発電システムは、一般家庭用(出力 3 kWレベル)でなく、メガソーラー(MWクラス)を想定した
- 太陽電池アレイの面積が大きいので、風速 5 m/s程度でも、乱流熱伝達率式が適用できる
- Sandia研究所提案のような出力評価が必要とされるのは、メガソーラークラスの場合であろう

### 熱収支 (6)式

- 新太陽エネルギー利用ハンドブック記載の「夜間放射による太陽電池温度低下」計算式を参考にして、昼間の熱収支式をたてると(6)式が得られる
- (6)式第1項  $(1-k_e) \cdot I_d$  は、日射強度のうち、電力に変換されるエネルギーを差し引いた残りが熱になるとした項である
- 表面反射は無いものと仮定する

### 熱収支 (6)式

- 第2項  $l_u$  は、モジュール(パネル)表面からの上向き長波放射である
- $l_u$  は黒体放射とし、(7)式を適用する
- 第3項は、モジュール表面から冷却風への熱伝達項である
- 乱流熱伝達率  $\alpha_1$  は(8)式を用いた(平板上熱伝達の公式)
- 第4項は、モジュール裏面からの冷却を示す

### 数値計算

- (6)式を解き、(4)式の線形仮定が成立するか、成立しないとすれば、差異はどの程度かを調べた
- (6)式は、第2項がTの4乗項、第3項・第4項がTの1乗項であって解析に解くのが困難なため、表計算ソフトExcelのゴールシーク機能を用いて数値計算した

### 数値計算

- 日射強度と風速は、それぞれ3段階に変化させ、結果を図1のように整理した(図1の中で9点を計算)
- モジュール裏面冷却は、3条件(表面と同じ両面冷却、裏面断熱、その中間条件)について計算し、また周囲温度、電力変換率をそれぞれ3段階に変化させ、それらを組合せた27通りにつき計算を行った

### 乱流熱伝達率

- 乱流熱伝達率について、学会予稿では「付録」に記載した
- 予稿「付録」はスペースが少なく、記載内容が限定されたので、さらにセッション当日配布「補足資料」を作成し、無次元量(ヌセルト数・レイノルズ数・プラントル数)の説明を、電気工学分野の出席者に分かり易く補足説明した

### 太陽電池アレイの大きさ

- PTC法により出力評価を行うのは、メガソーラークラス、少なくとも100 kWクラスの太陽電池アレイであると想定した
- 風の流れ方向の長さは、10 mあるものとし、中間位置  $x=5$  mでのレイノルズ数を、熱伝達率計算に用いた
- この位置でのレイノルズ数は、十分乱流遷移値を超えている

### 計算結果の考察

- 予稿図1に示すように、温度上昇(T-Ta)と風速Wsの関係は、上に凹の曲線となり、直線仮定との差異は最大2°C程度であった
- なおNEDO等で行われた実測例でも「上に凹」の傾向が得られている
- 温度上昇(T-Ta)と日射強度Lとの関係はほぼ線形で、直線仮定との差異は最大0.2°C程度であった

PVUSA Test Conditions(PTC)における太陽光発電システムの評価法と  
太陽電池モジュール温度特性との関係の考察

正員 大石紀夫 (金沢工業大学) 学生員 石田誠 (金沢工業大学)  
正員 渡邊百樹 (シャープ) 正員 橋泰至 (石川県工業試験場)

PVUSA Rating Method of Photovoltaic System and its Relation with the Temperature  
Characteristic of PV Module

Norio Oishi, member, (Kanazawa Institute of Technology), Makoto Ishida, student-member, (ditto),  
Momoki Watanabe, member, (Sharp Corporation),  
Yasushi Tachibana, member, (Industrial Research Institute of Ishikawa)

1. まえがき

PVUSA は 1997 年に Sandia 国立研究所 (米国) から屋外出力レーティング方法として提案され<sup>(1)</sup>,既に米国では太陽光発電の評価手法として認知されている。しかしながら日本国内では未だ PVUSA Test Conditions(以下 PTC)での評価報告事例<sup>(2)</sup>は少ない。本報告は PTC 評価式中の各係数と太陽電池モジュール温度特性との関係を考察し,太陽光発電システムの評価に PTC 手法を活用する場合の参考と供することを目的とする。

なお文献<sup>(1)</sup>の PTC 評価式は(1)式で表されている;

$$P = Irr * (A + B * Irr + C * Tamb + D * WS) \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $P$ : 太陽電池出力 [kW],  $Irr$ : 日射強度 [W/m<sup>2</sup>],  $Tamb$ : 周囲温度 [°C],  $WS$ : 風速 [m/s],  $A, B, C, D$ : 屋外曝露データから得られる回帰係数。

本報告では(1)式の記号を改めて(2)式のように表す;

$$P = L * (A + B * L + C * Ta + D * WS) \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $P$ : 太陽電池出力 [kW],  $L$ : 日射強度 [W/m<sup>2</sup>],  $Ta$ : 周囲温度 [°C],  $WS$ : 風速 [m/s],  $A, B, C, D$ : 回帰係数。

2. PTC と太陽電池モジュール温度特性との関連付け

太陽電池出力が温度に対して -0.5[%/°C]の割合で変化するとすれば,太陽電池モジュール温度  $T$  [°C],日射強度  $L$  [W/m<sup>2</sup>]での太陽電池出力  $P_t$  [kW]と,太陽電池モジュール温度 25[°C],日射強度 1000[W/m<sup>2</sup>]での出力  $P_{25}$  [kW]との関係を表す式は,

$$P_t = P_{25} * (L/1000) * [1 - 0.005 * (T - 25)] \dots\dots\dots (3)$$

となる。

一方太陽電池モジュール温度  $T$  は,日射強度が強ければ高くなり,風速が強ければ低下する。周囲温度  $Ta$  を基準として,これらの関係が線形であると仮定し (この仮定の妥当性は 3 章で検討する),  $k_1, k_2$  を正の係数とすると,  $T$  は,

$$T = Ta + k_1 * L - k_2 * WS \dots\dots\dots (4)$$

と表される。(4)式を(3)式に代入して整理すると;

$$P_t = (L/1000) * [1.125 * P_{25} - 0.005 * k_1 * P_{25} * L - 0.005 * P_{25} * Ta + 0.005 * k_2 * P_{25} * WS] \dots\dots\dots (5)$$

となり,(2)式に対応する形の式が得られる。

3. 太陽電池モジュール温度

太陽電池モジュール温度  $T$  と  $L, WS$  との関係を熱工学理論から導き,(4)式の線形仮定との間にどの程度の差異があるかを検討する。3 章においては温度を [K] で表す。

(3-1) 太陽電池表面熱収支

文献<sup>(3)</sup> 44 頁 1.3.4 「夜間放射による太陽電池温度低下」の項に記載された熱収支式を参考にして,昼間の熱収支式をたてると,

$$(1 - ke) * Id - Iu - \alpha_1 (T - Ta) - \alpha_2 (T - Ta) = 0 \dots\dots (6)$$

ここで  $ke$ : 電力変換率,  $Id$ : 日射強度 [W/m<sup>2</sup>],  $Iu$ : 上向き長波放射 [W/m<sup>2</sup>],  $\alpha_1$ : 風速  $WS$  [m/s] での乱流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)],  $T$ : 太陽電池温度 [K],  $Ta$ : 周囲温度 [K],  $\alpha_2$ : 太陽電池裏面の熱通過率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]。表面の反射率 (アルベド) は 0 とする。(6)式第 1 項の  $Id$  の係数  $(1 - ke)$  は,日射強度の内,太陽電池で電力に変換されるエネルギーを差し引き,熱に変換される比率を表す乗数である。

$Iu$  太陽電池パネル表面からの放射は温度  $T$  の黒体放射

(文献<sup>(1)</sup>107 頁(3.2.3)式)とする。

$$h_u = 5.67 \times 10^{-8} T^4 \dots\dots\dots (7)$$

(3-2) 乱流熱伝達率

文献<sup>(1)</sup>110 頁平板上の乱流熱伝達の式から、

$$\alpha_1 = 3.15 Ws^{0.8} \dots\dots\dots (8)$$

となる。詳細は付録に示す。

(3-3) 太陽電池温度の数値計算

上記(6)式を解き、太陽電池温度と日射強度・風速との関係を求める。(6)式を解析的に解くのは困難なので表計算ソフト(Excel)のゴールシーク機能を使って解を求めた。

日射強度は 850, 750, 650[W/m<sup>2</sup>]の3段階に、風速は 2, 5, 8[m/s]の3段階に変化させた。

太陽電池裏面の熱透過率  $\alpha_2$  は太陽電池モジュール設置状態により決まる値で、屋根密着設置の断熱条件 ( $\alpha_2=0$ )、架台設置の両面冷却条件 ( $\alpha_2=\alpha_1$ )、それらの中間状態として文献<sup>(1)</sup>45 頁例題の  $\alpha_2=2$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] の3条件を比較した。周囲温度  $T_a$  は 288, 298, 308[K] の3条件につき、また電力変換率  $ke$  は 0.10, 0.15, 0.20 の3条件を比較した。

(3-4) 計算結果

前項各条件の組み合わせで計算した結果、太陽電池温度上昇 ( $T-T_a$ ) と日射強度  $L$  の関係はほぼ線形で、直線関係からのズレは最大 0.2[°C]程度であった。

温度上昇 ( $T-T_a$ ) と風速  $Ws$  の関係の一例 ( $T_a=298$ [K],  $ke=0.2$ ,  $\alpha_2=2$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]) を図 1 に示す。図 1 の例に示すように、風速との関係は直線から少しずれて上に凹の曲線となる。計算した範囲内で直線関係からのズレは最大 2[°C]程度であった。

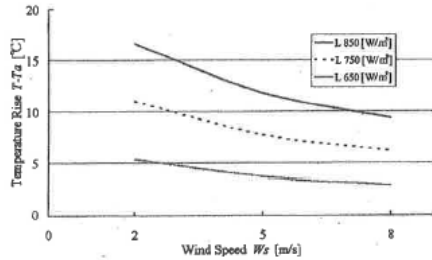


図 1 太陽電池温度上昇と風速の関係  
Fig.1 Calculated Relation of Module Temp.Rise vs.Wind Speed

4. むすび

太陽電池モジュール温度と日射強度・風速との関係を、熱工学理論から導かれる関係式と比較し、(4)式の線形仮定と理論計算値との程度の差異があるかを検討した結果、計算対象とした範囲内では最大 2[°C]以内の差で線形性が成立していることが分かった。

(4)式の係数  $k_1$ ,  $k_2$  は正なので、PTC 評価式(1)式または(2)式と(5)式を対比すると係数  $A, D$  は正、 $B, C$  は負とな

るはずである。文献<sup>(2)</sup>の実測値でも夏期実測値を回帰分析した結果の係数正負はこの通りとなっている。本論文の考察により、PTC 評価式中の各係数 ( $A, B, C, D$ ) の位置づけがかなり明らかになったと考える。

大規模太陽光発電システムの温度特性は架台設置型につき報告された例<sup>(4)</sup>があるが、今後の課題として、特に日本の気象条件下で文献<sup>(3)</sup>のような屋根設置型やビル設置型を含めて温度特性および PTC 評価データを集積し、本文(4)式の線形仮定の妥当性を検証する必要があると考えられる。

付録 乱流熱伝達率  $\alpha_1$

文献<sup>(1)</sup>111 頁 3.3.2 b) 「平板上の乱流熱伝達」を参照して計算を行う。なお付録内では風速の記号を  $U$  [m/s] とする。

PTC 評価は 100[kW] 以上の太陽光発電システムを対象とすると想定されるので、太陽電池アレイ全体の長さ  $x=10$  [m] とし、 $x=5$  [m] 位置での熱伝達率を求めて代表値とする。風の流れ方向はアレイ長さ方向と平行、すなわち  $x$  軸方向とする。流体 (常温空気) の熱伝導・粘性・比熱等各種物理定数は熱工学・流体工学の関係書に記載されているので詳細を省略する。

風速  $U=5$  [m/s] の場合、 $x=5$  [m] 位置におけるレイノルズ数は  $Re=xU/\nu=1.61 \times 10^5$  となる。プラントル数は  $Pr=Cp\mu/\lambda=0.695$  である。これより文献<sup>(1)</sup>111 頁(3.3.19)式を使ってヌセルト数  $Nu=0.0296Re^{0.8}Pr^{0.4}=2.20 \times 10^3$  と求まる。熱伝達率は  $\alpha_1=Nu\lambda/x=11.4$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]。  $\alpha_1$  は  $U^{0.8}$  に比例するので、 $\alpha_1=3.15U^{0.8}$  と表される。風速の記号を  $Ws$  に変えたのが本文(8)式である。

文 献

- (1) C.M.Whitaker, T.U.Townsend, J.D.Newmiller, D.L.King, W.E.Boyson, J.A.Kratochvil, D.E.Collier and D.E.Osborn: "Application and Validation of a new PV Performance Characterization Method", Presented at the 26th IEEE PV Specialists Conference, Anaheim, CA, USA (1997-9)
- (2) Y.Tachibana, K.Nakano, S.Kanno, M.Watanabe, H.Yoda and N.Oishi: "Report on evaluation of 200kW PV system by PVUSA Test Conditions", Presented at the 2004 Annual Meeting of the Japan Solar Energy Society (2004-11) (in Japanese)  
橋本至・中野幸一・漢野敬泰・渡邊百樹・依田弘之・大石紀夫: 「太陽光発電システムの PTC における評価事例報告」平成 16 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会 (2004-11)
- (3) New Solar Energy Utilization Handbook, Japan Solar Energy Society (2000) (in Japanese)  
新太陽エネルギー利用ハンドブック, 日本太陽エネルギー学会 (2000)
- (4) M.Yukawa, M.Asaka, K.Takahara, T.Oshiro and K.Kurokawa: "Estimation of Photovoltaic Module Temperature Rise", T.IEEJapan, Vol.116-B, No.9, pp.1101-1110 (1996-9) (in Japanese)  
湯川元信・浅岡正久・高原景雄・大塚隆光・黒川啓助: 「太陽電池モジュール温度上昇の推定」, 電学論 B, 116, 9, pp.1101-1110 (1996-9)

## 論文番号 262 「PVUSA Test Conditions(PTC)における太陽光発電システムの評価法と太陽電池モジュール温度特性との関係の考察」 補足資料

金沢工業大学 大石紀夫

論文（予稿）付録において、スペースの関係上一部省略した物理定数の記載を下記の通り補足した形で、改めて乱流熱伝達率の求め方を説明します。また誤字1箇所を訂正致します。

付録 乱流熱伝達率  $\alpha_1$ 

文献<sup>①</sup> 111 頁 3.3.2 b) 「平板上の乱流熱伝達」を参照して計算を行う。なお付録内では参考文献に従い風速の記号を  $U$  [m/s] とする。

(1) 文献<sup>①</sup> 111 頁(3.3.19)式に示されるように、熱伝達率はヌセルト数  $Nu=0.0296Re^{0.8}Pr^{0.4}$  から求められる。ヌセルト数は無次元熱伝達率とも呼ばれる無次元量で、これを有次元化することにより  $\alpha_1$  が求まる。

(2) PTC 評価は 100 [kW] 以上の太陽光発電システムを対象とすると想定されるので、太陽電池アレイ全体の長さを  $x=10$  [m] とし  $x=5$  [m] 位置での熱伝達率を求めて熱計算使用の代表値とする。風の流れ方向はアレイ長さ方向と平行、すなわち  $x$  軸方向とする。

以下、風速  $U=5$  [m/s] の場合の各種無次元数を示し、最後に風速  $U$  に対する熱伝達率の式として表す。

(2) レイノルズ数  $Re$  は流体流れの乱流の程度を示す無次元量である。

$x=5$  [m] 位置におけるレイノルズ数は  $Re=xU/\nu=1.61 \times 10^6$  となる。

ここで、 $\nu$ ： 常温空気の動粘性係数 ( $=0.155 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s])

このレイノルズ数は乱流遷移値 ( $3.2 \times 10^5$ ) を超えているので、流れは乱流である。

(3) プラントル数  $Pr$  は、物体表面流体流れの境界層内の温度分布と速度分布の類似度を表す無次元量で、常温空気の場合は次の値となる；

$$Pr=C_p\mu/\lambda=0.695$$

ここで、 $C_p$ ： 定圧比熱 ( $=1.00$  [kJ/(kg·K)])

$\mu$ ： 粘性係数 ( $=1.80 \times 10^{-3}$  [Pa·s])

$\lambda$ ： 熱伝導率 ( $=0.0259$  [W/(m·K)])

(4) 上記の  $Re$ ,  $Pr$  の数値を代入してヌセルト数  $Nu$  は以下のように求められる；

$$Nu=0.0296Re^{0.8}Pr^{0.4}=2.20 \times 10^4$$

(5) これにより熱伝達率  $\alpha_1$  は下記の値となる；

$$\alpha_1=Nu\lambda/x=11.4 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$$

(6)  $\alpha_1$  は  $U^{0.8}$  に比例するので、 $\alpha_1=3.15U^{0.8}$  と表される。

風速の記号を  $Ws$  に変えたのが論文(予稿)(8)式である。

文献(3) 新太陽エネルギー利用ハンドブック、日本太陽エネルギー学会(2000)

誤字訂正 論文(予稿)付録11行目(第3段落2行目)を下記のように訂正します；

(誤)  $Re=xU/\nu=1.61 \times 10^5$  となる。 (指数 10 の 5 乗)

(正)  $Re=xU/\nu=1.61 \times 10^6$  となる。 (指数 10 の 6 乗) 以上