

# 照度・温度を考慮した太陽電池の ファジイ補間による簡易モデル

Simplified Model of Photovoltaic Modules Using Fuzzy Interpolation Considering Intensity of Solar Radiation and Temperature

近藤康夫<sup>\*1</sup>  
Yasuo KONDO

安野卓<sup>\*2</sup>  
Takashi YASUNO

鎌野琢也<sup>\*3</sup>  
Takuya KAMANO

大西徳生<sup>\*4</sup>  
Tokuo OHNISHI

鈴木茂行<sup>\*5</sup>  
Takayuki SUZUKI

## Abstract

The output power induced in the photovoltaic modules is influenced by intensity of irradiance and temperature of the solar modules. Therefore it is necessary to estimate the characteristics of PV modules precisely in order to construct a controller of model reference adaptive system and so on.

This paper presents an approach to estimate the I-V curves of photovoltaic modules using fuzzy interpolation. The model is composed of data on short circuit current, open circuit voltage and voltage and current of maximum power point under conditions of several different temperatures and high level intensity of the sunshine. The curve fill factor of modules under the above-mentioned conditions can be used instead of maximum power point dates. The remarkable nonlinear curve between voltage and current of PV module is described by three approximating straight-lines employing fuzzy interpolation.

キーワード： 太陽電池， I-V特性， ファジイ補間， 照度， 温度

Key Words : Photovoltaic module, I-V characteristics, Fuzzy interpolation, Irradiance, Temperature

## 1. はじめに

太陽電池は入射光の照度やパネルの温度などの環境変化の影響によって、その出力特性が著しく変動するため、それらの動作状況に応じて最大出力動作点で作動するように制御を行う必要がある。

最大電力取得制御法としては、太陽電池の特性をブラックボックスとして、動作電圧と電流を検出して、出力が最大となる動作点に移動させる制御があり、実用化されている手法としては山登り法があり、ファジイ制御による方法などが提唱されている<sup>1)~3)</sup>。

山登り法は動作点を常に変動させる必要があるために、定常的な電力の動搖や過渡時の応答に時間を要することなどの問題点がある。また、太陽電池のI-V特性を基礎

式から算定しようとすると、等価回路定数や種々のパラメータの設定および温度補正などの考慮が必要であり、実システムにおいては実用的でない。

一方、照度と温度の条件が得られて、それらデータを用いて太陽電池の特性を十分な精度で推定することができると、モデル規範形適応制御系を構成して、より高度な最大出力制御性能をもった太陽光発電システムを構築することやフィードフォワード制御系の構成などが期待できる有用である。

太陽電池のI-V特性を求める手法は瀬川氏ら<sup>4)</sup>及び伊賀氏<sup>5)</sup>による光照射状態での電圧-電流特性式を用いたI-Vカープの作成法、山本・伊賀氏<sup>6)</sup>らによる基準状態でのI-Vカープから曲線因子を活用したI-Vカープの作成法などが報告されている。これらは基礎式を用いた計算手法であり、複雑なプログラムにより相当量の計算が必要である。

これに対して筆者らは任意の照度と温度の条件に対して、ファジイ補間法により太陽電池のI-V特性を推定する簡易モデルを考案した。具体的には、比較的高いレベルの照度において若干の異なる温度条件に対して、短絡電流、

\*1 新居浜工業高等専門学校教授(〒792-8580 新居浜市町7-1)  
e-mail : kondo@ele.niihama-nct.ac.jp

\*2 德島大学工学部 講師

\*3 德島大学工学部 助教授

\*4 德島大学工学部 教授

\*5 德島大学工学部 教授

(原稿受付：2002年1月7日)

開放電圧および最適動作点のデータが与えられた場合に、任意の動作条件に対する出力特性を推定するものである。また、最適動作点が与えられない場合には曲線因子を用いて最適動作点を得る手法も導出している。与えられたそれらのデータから作成した3本の近似直線を数組構成し、ファジイ補間により太陽電池のあらゆる動作条件に対する電圧-電流特性曲線を推定するものである<sup>7)-9)</sup>。

供試太陽電池の数値例について、本モデルの出力特性と実測データの比較を行ったが、両者の結果が良く一致していることを確認した。温度や照度の変化によって出力特性が著しく変動する太陽電池を、ここに提案する簡易モデル用いて最大出力制御を行なう場合にも、実用的には充分な精度であると思われる所以報告する。

## 2. ファジイ補間とその特性

太陽電池の照度特性曲線および温度特性曲線がカタログデータまたは実測データとしてかなり正確に得られる場合もあるが、照度と温度のあらゆる動作条件に対する特性が十分には得られない場合が多い。また銘板には照度と温度の基準状態における短絡電流、開放電圧および最適動作点の電圧、電流値しか表示されない場合が多い。

一般に太陽電池の電圧-電流特性は付録に示す(付録1)式で表わされるが、この基礎式から特性を数値計算するに際して、幾つかのパラメータの設定が必要となり煩雑である。そこで比較的高いレベルの照度において若干の異なる温度条件に対して、短絡電流、開放電圧および最適動作点の電圧、電流等のデータが与えられた場合に任意の動作条件に対する特性を推定する。それらのデータは比較的容易に測定することもできる。短絡電流は温度による変動が極めて小さいので一つの値でもよい。太陽電池が使用される温度の範囲内において、2~3の異なる温度に対する開放電圧と最適動作電圧を測定する。その際に照度が100[mW/cm<sup>2</sup>]の基準状態に対応するよう各電流値を換算する。なお、最適動作電圧が測定し難い場合には、後述する曲線因子から推定することもできる。

### 2.1 3本の近似直線によるファジイ補間

太陽電池の出力電流  $I$  [A] を照度  $L$  [mW/cm<sup>2</sup>] および温度  $T$  [°C] をパラメータとして動作電圧  $V$  [V] の関数とする。図1に破線で示すように著しい非線形特性をもつ電圧-電流特性曲線を短絡電流  $I_{sc}$ 、開放電圧  $V_{oc}$  および最大出力動作点 ( $V_{op}$ ,  $I_{op}$ ) を通る3本の直線群を用いて、ファジイ補間により推定する。モデリングの手法としては、前件部と後件部の構造が決定されており、両者のパラメータを与えて、太陽電池の動作電圧を入力と

し電流または電力を出力とするものである。

ここで、直線  $I_1$  は短絡電流の値  $I_{sc}$  を通り等価回路の並列抵抗の逆数の傾斜をもつ直線である。並列抵抗の値が分らなければ傾斜を零とする。後述する根拠により最適動作電圧の65~75%程度の電圧値を  $V_1$  として、直線  $I_1$  上に点 ( $V_1$ ,  $I_1$ ) を定める。直線  $I_2$  は点 ( $V_1$ ,  $I_1$ ) と最適動作点を通る直線である。直線  $I_3$  は最適動作点と開放電圧  $V_{oc}$  を通る直線である。

照度  $L$  が特定の値  $L_1$  であり、図1の下部に示すような三角形メンバーシップ関数によって電圧をファジイ変数  $A_1$  に変換すれば、電流  $I$  は次式で表わされる。

If  $L$  is  $L_1$  and  $V$  is  $A_1$

$$\text{then } I \text{ is } \mu_1 i_1 + \mu_2 i_2 \quad (1)$$

ここで  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  は図1に示すように電圧が  $V_1$ ,  $V_{op}$ ,  $V_{oc}$  である度合であり、  $i_1$ ,  $i_2$  は任意の電圧に対する補間に用いる2直線上の電流値である<sup>10)</sup>。

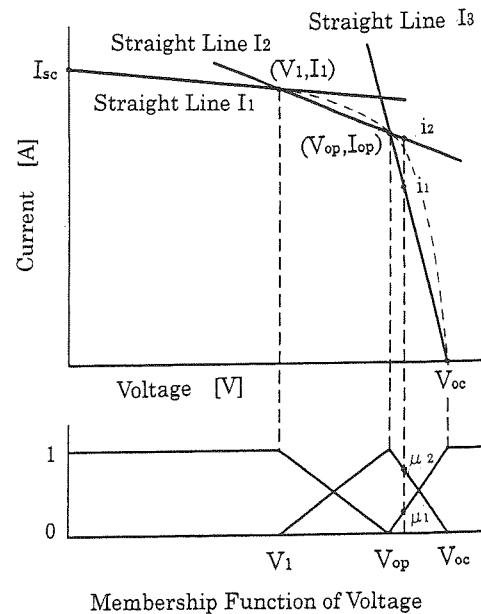


Fig.1 Fuzzy interpolation using three approximate straight lines

### 2.2 温度特性及び照度特性

太陽電池は温度によって開放電圧や最適動作電圧が変動し、これらの関係は付録の(付録2)式に示されるが、地上で使用される温度の範囲ではほぼ比例的に変化する。ここではシャープ(株)製シリコン単結晶NT181型供試太陽電池パネルのカタログデータの照度特性および温度特性を数値例としてモデリングを行った。照度が最大値付近の温度特性から、パネル温度が0, 25, 50, 75[°C]の各値に対する短絡電流、開放電圧および最適動作点のがデ

ータから、図2のような直線群を構成する。それに(1)式による補間を行えば図3のように特定の温度に対する特性曲線群が得られる。

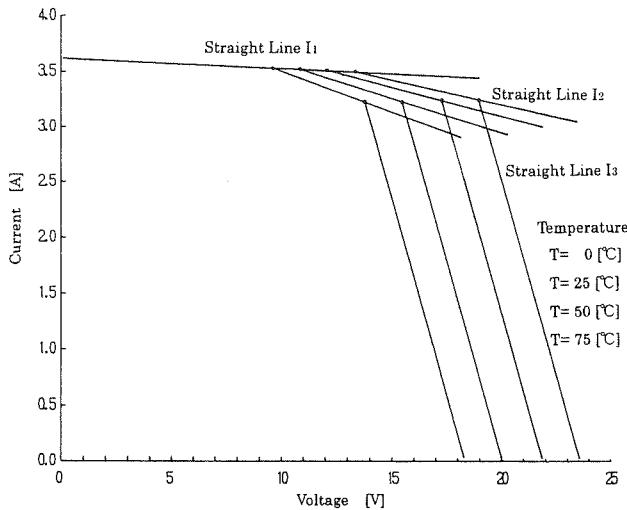


Fig. 2 Group of approximate straight lines

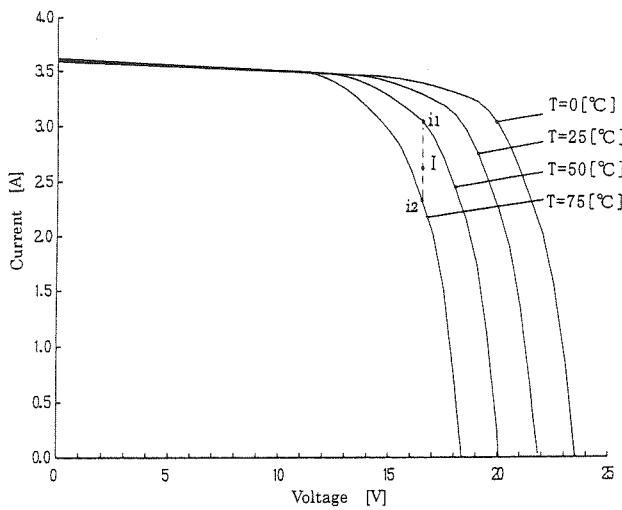


Fig. 3 Characteristics of model for specified temperature

次に図4に示すように、温度Tのメンバーシップ関数A<sub>2</sub>を定める。

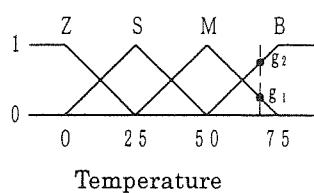


Fig. 4 Membership function of temperature

ここで任意の動作温度Tを設定すると、その温度に対する電流Iは次の補間ににより求められる。

If L is L<sub>1</sub> and T is A<sub>2</sub>, then

$$I = g_1 i_1 + g_2 i_2 \quad (2)$$

ここでg<sub>1</sub>, g<sub>2</sub>は図4に示すように温度が0, 25, 50, 75 [°C]の各値に対する度合いであり、i<sub>1</sub>, i<sub>2</sub>は図3のように温度の値が0, 25, 50, 75 [°C]のうち任意の温度に対する補間に用いる2曲線上の電流値である。なおi<sub>2</sub>は必要な範囲で負の値まで外挿したものを用いる。そこで誤差が生じることになるが、電流の値が小さい領域であるから、実用上は差し支えが少ない。

これまでの過程で得られた特性曲線は、照度が100[mW/cm<sup>2</sup>]に対するものである。任意の照度に対する電圧-電流特性は、(付録1)式から明らかなように、照度の変化によって光電流I<sub>ph</sub>が照度に比例して変化することから、短絡電流値I<sub>sc</sub>を照度に比例して定めて、100[mW/cm<sup>2</sup>]に対する曲線を電流軸方向に平行移動すればよい。

### 2.3 出力特性

このようにして作成したI-V特性を照度および温度をパラメータとして、電圧-電力特性曲線として描いたものが図5である。

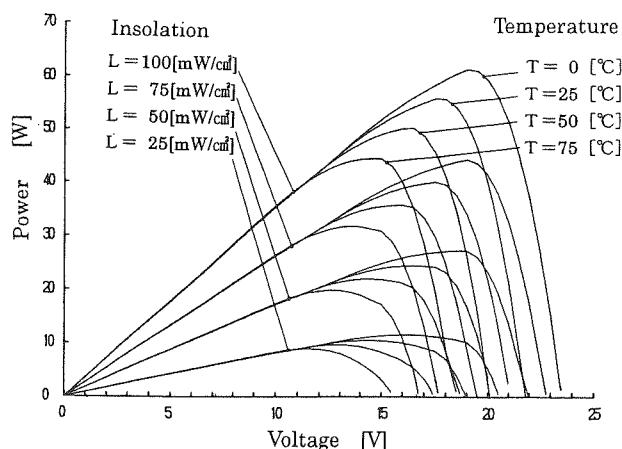


Fig. 5 Characteristics of model (voltage vs power)

本モデルの特性の精度を評価するための評価関数を次のように定義する

$$J = (1/m) \sum_{n=1}^m \left\{ \frac{|I_0 - I|}{I_0} \times \left( P / P_{max} \right) \right\} \times 100 \quad (6)$$

ここでI<sub>0</sub>:真値、I:特性値、P:電力、P<sub>max</sub>:最大電力、n=1~mは電圧をm等分した各評価点である。P/P<sub>max</sub>を掛けることにより、最大出力制御を行なうことを前提として、最大電力動作点付近での誤差を重視した評価とした。この評価関数により、基準状態において本方式の特性とカタログデータとの誤差評価値は1.37[%]である。

また、近似直線I<sub>2</sub>を定義した際に定めた点V<sub>1</sub>を最適動

作電圧の 65~75[%]程度としたが、供試太陽電池の場合には 65, 70, 75[%]の各値に対する誤差評価値が 1.41, 1.37, 1.39 であった。これより太陽電池の種類と特性にも依存するが、 $V_i$  をこの程度に設定して差し支えないと見える。

### 3. 曲線因子から最適動作点を得る方法

太陽電池の短絡電流と開放電圧を測定することは、最適動作条件を測定することに比べて容易である。そこで、幾つかの異なる温度に対する短絡電流と開放電圧の値及び太陽電池の曲線因子 FF を用いて、それらの温度に対応する最適動作点の電圧および電流を求める手法を述べる。

#### 3.1 近似直線の設定

図 6 に示すように、値が既知である短絡電流  $I_{sc}$  と開放電圧  $V_{oc}$  を通る 3 本の近似直線を次ぎのように定める。

まず直線  $I_1$  は短絡電流の値  $I_{sc}$  を通り等価回路の並列抵抗の逆数の傾斜をもつ直線とする。

$$I_1 = I_{sc} - (1/R_{sh})V \quad (7)$$

次に開放電圧  $V_{oc}$  の 60[%]程度の電圧を  $V_{11}$  として、直線  $I_1$  上に点  $(V_{11}, I_{11})$  をとり、直線  $I_2$  は点  $(V_{11}, I_{11})$  を通り傾斜を  $d_1$  とする直線とする。

$$I_2 = d_1(V - V_{11}) + I_{11} \quad (8)$$

直線  $I_3$  は開放電圧  $V_{oc}$  を通り  $d_2$  の傾斜の直線とする。

$$I_3 = d_2(V - V_{oc}) \quad (9)$$

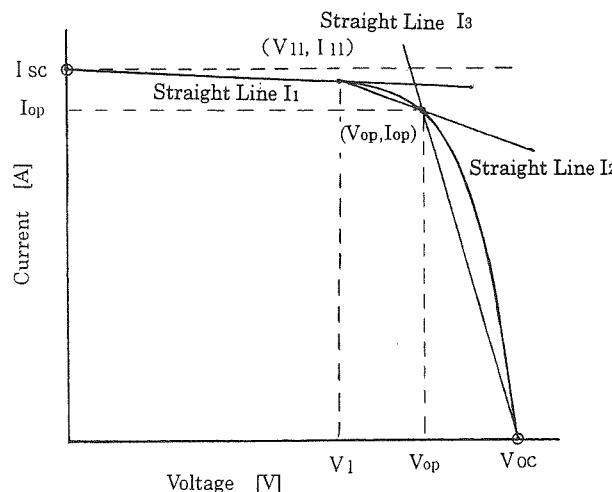


Fig. 6 Three approximate straight lines

#### 3.2 直線の傾斜と最適動作点

ここで、直線  $I_2$  と  $I_3$  の交点  $(V_{op}, I_{op})$  が最適動作点であるとすれば、(7)~(9)式から

$$V_{op} = (d_1 V_{11} - d_2 V_{oc} - I_{11}) / (d_1 + d_2) \quad (10)$$

$$I_{op} = d_2 / (d_1 - d_2) \{d_1(V_{11} - V_{oc}) - I_{11}\} \quad (11)$$

として表わすことができる。ここで  $d_1, d_2$  の値を求めるために、二つの方程式を立てる。

まず、太陽電池の曲線因子(curve fill factor)は

$$FF = \frac{V_{op} I_{op}}{V_{oc} I_{sc}} \text{ で表わされるから}^{11)} \quad (12)$$

$$FF = \frac{(d_1 V_{11} - d_2 V_{oc} - I_{11}) d_2 \{d_1(V_{11} - V_{oc}) - I_{11}\}}{(d_1 - d_2)^2 V_{oc} I_{sc}} \quad (12)$$

が得られる。

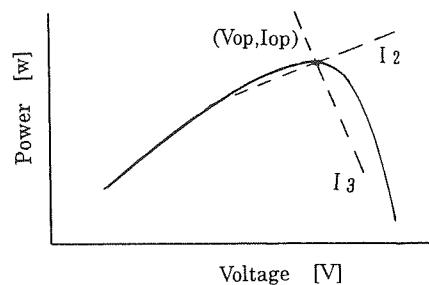


Fig. 7 Point of intersection of straight  $I_2, I_3$  and maximum power

次に、直線  $I_2$  と  $I_3$  の交点  $(V_{op}, I_{op})$  が最適動作点であるためには、図 7 のようにその動作点の左近傍において、直線  $I_2$  に漸近する電流値と電圧により発生する電力を電圧で微分した値が零となる。すなわち

$$\frac{d}{dV} [\{d_1(V - V_{11}) + I_{11}\} V] \Big|_{V \rightarrow V_{op}} = 0 \quad (13)$$

これより

$$V_{11} d_1^2 + (d_2 V_{11} - 2d_2 V_{oc} - I_{11}) d_1 + d_2 I_{11} = 0 \quad (14)$$

が得られる<sup>12)</sup>。

$F\ F$  の値を与えて、(12)(14)式の連立方程式の解として  $d_1$  と  $d_2$  の値を求める際に、4 次式となり一般的に数値解を求めることが困難となる。そこで  $d_2$  の値を仮定して(12)式から  $d_1$  を求め、それらの値を(14)式に代入して、同式を満足するよう試行錯誤により  $d_2$  と  $d_1$  の値を決定する。これを用いて(10)(11)式から最適動作点  $(V_{op}, I_{op})$  を求めることができる。

なお一般に  $F\ F$  の値は照度と温度が基準状態における値が示されており、温度の変化により変動するが、 $V_{op}$  の温度特性が  $V_{oc}$  とほぼ同様に変化するので、その他の温度の  $V_{op}$  は基準状態の開放電圧  $V_{oc}$  を基にして、 $V_{oc}$  の変化分だけ電圧軸方向に平行移動させた値を用いることとする。

#### 3.3 曲線因子 $F\ F$ の値

ここで、太陽電池の曲線因子  $F\ F$  の値は、太陽電池の種類がシリコン単結晶および多結晶の場合には、大略 0.71 ~ 0.73 程度の値であり、製造業者によってその値がほぼ

特定化される傾向をもっている。またアモルファス・シリコン系の場合には、これより少しあい値となっている。

#### 4. 実験結果と検討

この簡易モデルの妥当性を検証するために、供試太陽電池パネルについて照度と温度を変化させてその出力特性を実測した。文献(13)に報告されている実システムでの使用環境データを参考にして、風速が3[m/sec]程度で、夏季、冬季の温度上昇値が約35および20[°C]として、外気温度を考慮して、温度は30, 45, 60[°C]に設定した。これらの環境を実現する為に、表面をアクリル板で覆い、密閉してヒーター及び冷風扇により温度を制御した。温度センサー(株アドバンテスト製TR1108-001型CC熱電対)を太陽電池裏面の保護膜の内側に取り付けて計測した。

温度測定の際には非接触型温度計(共立電気計器製M5500型)を用いて、太陽電池の表面ガラス温度と裏面保護膜の温度を測定して参考値とし、4~5[min]程度の時定数を持つ熱容量であることも考慮して、温度分布が均一な状態となるよう留意した。

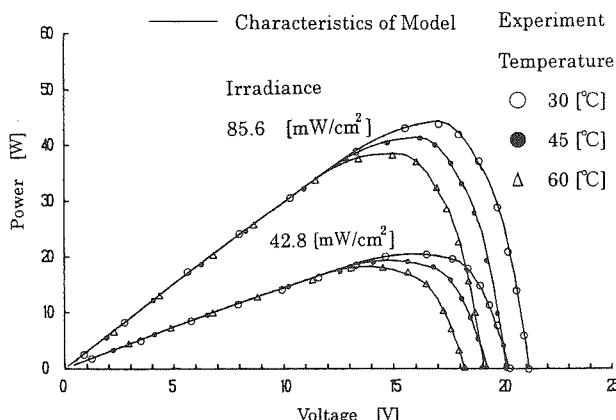


Fig. 8 Characteristics of model and experimental result

図8に本モデルの特性を実線で示し、実測結果を記号で示して比較しているが、両者は良く一致していることがわかる。

#### 5. まとめ

照度や温度によって出力が著しく変動する特性を持つ太陽電池について、ファジィ補間を用いて電圧-電流特性を推定する手法を提案した。

比較的高い照度において、2~3の異なる温度における短絡電流、開放電圧および最適動作電圧と電流が与えられると、3本の近似直線を数組用いて任意の動作点における出力特性を推定できる。最適動作電圧と電流の値が得られない場合は、曲線因子の値から最適動作点を求める方法を示している。

また、この出力特性は最大出力付近で精度が良く、太陽電池の最大出力制御を行なうことを前提とすれば、その近傍では実用化に必要な精度の特性が得られた。この手法を用いて、モデル規範型適応制御など、高度の最大出力制御が期待できる。

#### 参考文献

- (1) Chung · Yuen Won, Duk-Ieon Kim, Sei-Chan Kim, Won-Sam Kim and Hack-Sung Kim, A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays Using Fuzzy Controller, IEEE,(1994),396-403,
- (2) 千住智信・上里勝実・大熊繁、ファジィ制御による太陽電池の最大電力点の探索、電気学会論文誌D, 114-9(1994), 843 - 848.
- (3) Y.Kondo,H.Tsujimoto, Discussion on a Fuzzy Control for MPPT of Photovoltaic Modules, Memoirs of Niihama National College of Technology, 37(2001), 7-11.
- (4) 瀬川洋介・藤田嘉和・木田順三・石原好之・戸高敏之、太陽光発電システムのシミュレーション、太陽エネルギー、Vol. 15, No. 5 (1985), 38-46.
- (5) 伊賀 淳、太陽電池の光照射状態での電圧-電流特性式を用いたI-Vカーブ作成法とその活用、電気学会論文誌D, 116-10(1996), 1001 - 1009.
- (6) 山本博隆・伊賀 淳・石原薰・三田裕一・鈴木博久、I-Vカーブ作成法を用いた太陽光発電量シミュレーション計算プログラムの開発、電気学会論文誌D, 115-6(1995), 702 - 710.
- (7) 近藤康夫・安野卓・鎌野琢也・大西徳生・鈴木茂行、照度・温度を考慮した太陽電池の簡易モデル、平成12年電気学会全国大会講演論文集、東京。
- (8) 近藤康夫・安野卓・鎌野琢也・大西徳生・鈴木茂行、照度・温度を考慮した太陽電池の簡易モデルとその特性、平成12年電気産業応用部門大会講演論文集、徳島市
- (9) 近藤康夫・安野卓・鎌野琢也・大西徳生・鈴木茂行、照度・温度を考慮した太陽電池の簡易ファジィモデルとその特性(続)、平成13年電気産業応用部門大会講演論文集、松江市。
- (10) 菅野道夫著、ファジィ制御(1991), 137-177, 日刊工業新聞社、東京。
- (11) 濱川圭弘、太陽光発電(2000), 16-20, シーエムシー、東京。
- (12) 近藤康夫・安野卓・鎌野琢也・大西徳生・鈴木茂行、太陽電池のファジィモデリングとその特性、太陽／風力エネルギー講演論文集(2001), 香川県
- (13) 湯川元信・浅岡正久・高原景滋・大城壽光・黒川浩助、太陽電池モジュール温度上昇の推定、電気学会論文誌B, 116-9 (1996), 1101-1110.
- (14) 太陽電池専門委員会、太陽電池ハンドブック(1986), 202-203, 電気学会、東京。

## 付 錄

## 太陽電池の基礎式と温度特性

太陽電池の電圧  $V$  と電流  $I$  の関係は次式で表わされる。

$$I = I_{ph} - I_s [\exp\{q(V + R_s I) / (nkT)\} - 1] - (V + R_s I) / R_{sh}$$

(付録 1)

$I$  : 負荷電流[A]

$I_{ph}$  : 光電流[A]

$I_s$  : ダイオード飽和電流[A]

$q$  : 電荷量

$T$  : 温度[°C]

$k$  : ボルツマン定数

$n$  : ダイオード因子

$R_{sh}$  : 並列抵抗

$R_s$  : 直列抵抗

ここで開放電圧  $V_\infty$  は  $I = 0$  で  $V = V_\infty$  とし、短絡電流  $I_{sc}$  は、  $n = 1$ 、  $R_s = 0$ 、  $R_{sh}$  を無限大として、  $I = I_{ph}$  とすると

$$I_{sc} = I_s [\exp\{qV_\infty / (kT)\} - 1] \quad (付録 2)$$

また、ダイオード飽和電流  $I_s$  は次式で与えられる。

$$I_s = \gamma T^\delta \exp\{-E_{go} / (kT)\} \quad (付録 3)$$

$\gamma$  : 温度に依存しない定数

$E_{go}$  : 絶対零度に外挿した時の禁制帯幅

$\delta$  : 材質に依存する定数 (1~4の範囲)

一般に  $\exp\{qV_\infty / (kT)\} \gg 1$  であるから  $I_{sc}$  の式内の 1 を無視し  $E_{go} = qV_{go}$  と定義して、  $I_{sc}$  を  $T$  で微分し、  $dI_{sc} / dT$  の値が極めて小さいので無視すれば

$$dV_\infty / dT = -\{V_{go} - V_\infty + (kT/q)\delta\} / T \quad (付録 4)$$

となって開放電圧の温度係数が得られる<sup>14)</sup>.