

研究論文

系統連系型太陽光発電システム の年間発電量の予測

Annual Electricity Production of Photovoltaic Power Generation System
Connected With Commercial Power Source

縄 田 豊*
Yutaka NAWATA

Abstract

In the near future, a domestic photovoltaic power generation system connected with commercial power source will be used. This study represents a method for calculating annual power returning from such a photovoltaic system to a utility line. To develop the method, 1kW photovoltaic system was constructed, and a long-term test of the system in the natural weather conditions was performed. By analyzing the experimental results during both summer and winter, the following conclusions were derived.

The electric power generated by the photovoltaic array (P_D) can be calculated by the model equation of solar cell using the insolation (I_s) and array temperature (t_c), and the array temperature can be expressed by the following equation as a function of insolation, ambient temperature (t_a) and wind speed (V);

$$t_c = a + bI_s + ct_a + dI_sV$$

where a, b, c and d are constants. The AC power (P_A) delivered to the utility line by the DC/AC inverter can be expressed the following equation;

$$P_A = 0.907P_D - 63.0$$

By using these equations, the annual amount of the return electric power was evaluated from the weather data.

Key Words : Photovoltaic Power Generation System, Photovoltaic Array, Solar Cell, Solar Energy, Insolation

1. 緒 言

太陽光発電技術は新エネルギー利用技術の中で重要な位置を占めており、世界各国で実用化に向けて研究開発が進められているところである。太陽光発電システムを大別すると、①独立分散型、②系統連系型、③集中型、の3つに分類できる。②の系統連系型は個人住宅等に小規模太陽光発電システムを建設し、商用電源と連系するシステムであり、現時点では太陽電池発電量を商用電源系統に流入させることは許されていないが、将来有望なシステムとして電力会社を中心に開発が進められている^{(1)・(2)}。本研究は実験用の系統連系型システムを建設して長期の計測実験を行い、その結果を基に年間供給電力等を求めるための計算方法を導いたものである。

太陽光発電システムを建設する場合、普通は保守な

どの面で固定型アレイ方式をとる。そこでアレイ面積、アレイ傾斜角、アレイ方位角を定めると年間発電量の予測ができることが周辺機器の設定上望ましい。しかし太陽電池からの発生電力は電池の素子温度に影響されるため、気温と風速に左右され、日射量のみでは正確に予測できない。しかし気象条件による太陽電池温度の依存性を明らかにした報告がないため、通常は日射量だけで予測している。本研究では太陽電池温度の日射量、気温、風速による依存性を実験によって明らかにし、それら平均気象データがあれば直流変換器を通して系統と連系運転する場合の年間、期間発電量を精度よく計算できることを明らかにした。

2. 実験装置

表1に太陽光発電設備の主要項目を、図1にその外観を示す。太陽電池は多結晶シリコン製(京セラLA38 1J48)で1モジュール当たり0.44㎡のものを24枚用いた。

* 原稿受付 平成2年5月28日

*1 会員、八代工業高等専門学校(〒866 八代市平山新町2627)

表 1 太陽光発電設備の主要諸元

Solar cell array

- * Type : Silicon multicrystal solar cell
- * Area : 10.5 m² (0.44 m² × 24 units)
- * Slope angle : 26°
- * Azimuth angle : 0°
- * Peak output power : 1124 W
- * Optimum voltage : 200 V
- * Optimum current : 5.62 A
- (at 1 kW/m² of insolation and 25°C of cell temp.)

DC/AC Inverter

- * Type : Full bridge PWM inverter
- * Rating input voltage : DC 175-220 V
- * Line commuted voltage : AC 101 V (single phase)
- * Capacity of output power : 2 kW

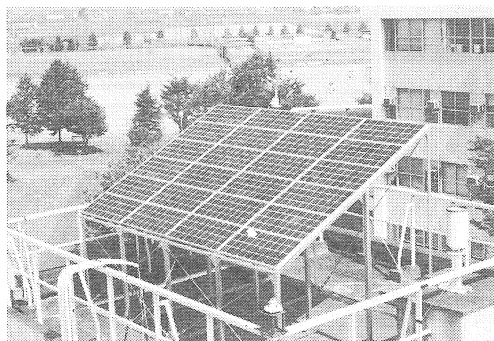


図 1 太陽電池アレイの外観

接続は12枚を直列につなぎ、2列を並列につないでいる。総面積は10.5m²である。アレイは方位真南、傾斜角26°に固定した。設置した場所は3階建ての建物の屋上で、その南側には遮蔽物はなく平坦な農地が続いている。最大出力は1124Wである。太陽電池からの発生電力は長期にわたる運転では保守、安全性で問題の多い蓄電池は用いず、直交流変換器を通して電力系統に供給する方式とした。図2に全体の系統図を示す。太陽電池からの出力は取り出す電圧値によって異なってくるが、本変換器は日射量が変化しても太陽電池からの出力がほぼ最大となる最適電圧200Vに出力電圧が常に一定になるように制御している。この直交流変換器は近い将来、一般家庭用として電力系統と連系運転されることを想定し、特に安全性(停電時の保護)や保守性

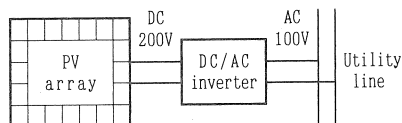


図 2 システム図

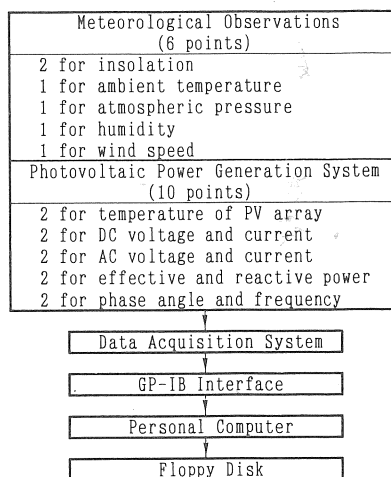


図3 計測システム

(無保守)および系統との連系性能に重点を置き、低騒音でかつ小形の太陽光発電用高周波インバータ(パワーMOS-FETモジュール使用)として開発されたものである⁽³⁾。また太陽電池アレイからの直流電圧を監視することによって本変換器は自動的に起動・停止が行える。

パーソナルコンピュータを用いた太陽光および気象に関する長期データ収録システムを完成させた。計測点は計16点でその内訳を図3に示す。日射量は全天日射計(英弘 MS-42)2台をアレイから2m以内のほぼ同じ高さに設置し、アレイと同じ傾斜面および水平面日射量を測定している。風速計はアレイの斜め前方5m、アレイ上方1mに設置し、平均風速を測定している。また気温はアレイを設置した建物近傍の地上に設置した百葉箱内の抵抗温度計で測定した。計測は1分間隔で1989年7月5日～9月4日の夏期62日間と1990年1月6日～2月28日の冬期52日間について行った。

3. 実験結果および考察

3.1 太陽電池アレイの特性

図4に日射量、アレイ直流発生電力等の時間変化の測定例を示す。この図でも t_a は気温[°C]、 I_s は日射量[W/m²]、 t_s はアレイ温度[°C]、 V は風速[m/s]、 P_d は直流アレイ発生電力[W]、 P_a は交流供給電力[W]である。日射量はアレイと同じ傾斜面での測定値である。またアレイ温度 t_s とは太陽電池の裏側に熱電対を接着し、その上を断熱材で覆い測定したもので、近似的に太陽電池の素子温度となる。断熱材の熱伝導率と厚さより計算した推定誤差は1°C以内である。図からアレイ発生

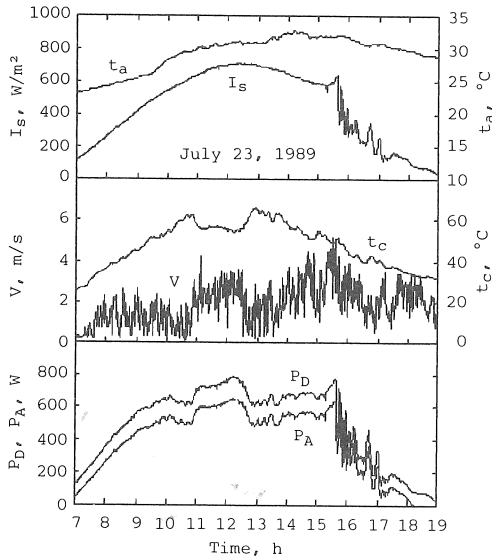


図4 発電量等の測定例

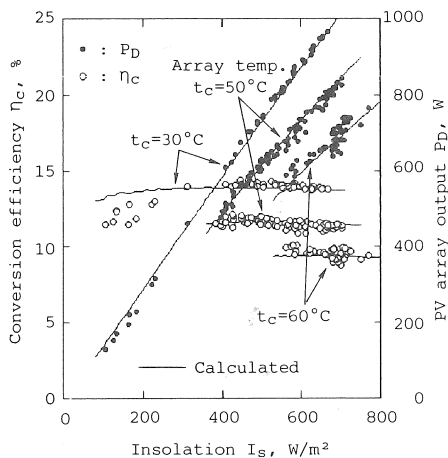


図5 アレイ発生電力と変換効率

電力は日射量と、風速つまりアレイ温度に大きく影響されていることがわかる。

図5は直交流変換器に入る前の太陽電池アレイの直流出力、およびそれと日射量の比である太陽電池変換効率の日射依存性を示したものである。この図の一つのデータは、日射量などが1分前の値と比較して5%以内の変動しない場合の連続した10分間の平均値を示している。つまり近似的に定常状態と考えられる場合のデータである。夏期と冬期における全計測データを整理し、条件に合うものを選び出してプロットした結果を示している。一般に太陽電池の電圧・電流特性は次式で表される⁽⁴⁾。

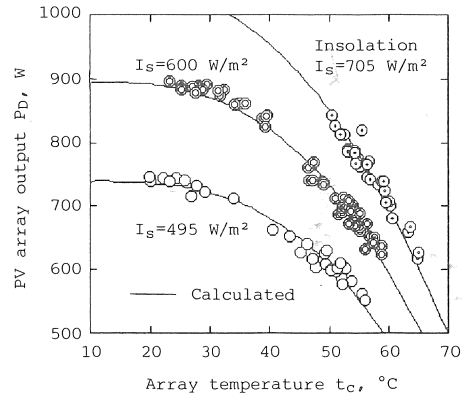


図6 発生電力に及ぼすアレイ温度の影響

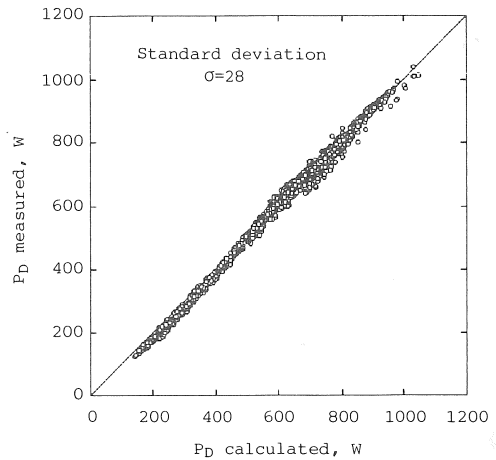


図7 発生電力の計算値と実測値の比較

$$I_D = I_L - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{q(V_D + R_s I_D)}{n k T} \right) - 1 \right\} - \frac{V_D + R_s I_D}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_0 = C_0 T^3 \exp \left(- \frac{q E_g}{n k T} \right) \quad (2)$$

$$I_L = 5.46 \times 10^{-4} \times I_s \{ 1 + 0.001(T - 301) \} \quad (3)$$

ここで

I_D : 出力電流[A] q : 電子の電荷量 [C]

V_D : 出力電圧[V] n : 接合定数

I_L : 光起電流[A] k : ボルツマン定数 [J/K]

I_0 : 飽和電流[A] T : 素子絶対温度 [K]

R_s : 直列抵抗[Ω] C_0 : 飽和電流温度係数

R_{sh} : 並列抵抗[Ω] E_g : エネルギーギャップ[eV]

本実験に用いた太陽電池アレイの電流・電圧特性を測定し、それより使用したセルのダイオードパラメータ

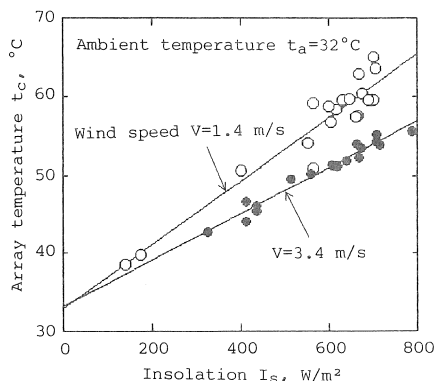


図8 アレイ温度に及ぼす日射量の影響

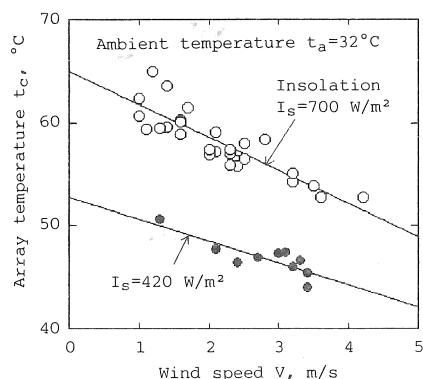


図9 アレイ温度に及ぼす風速の影響

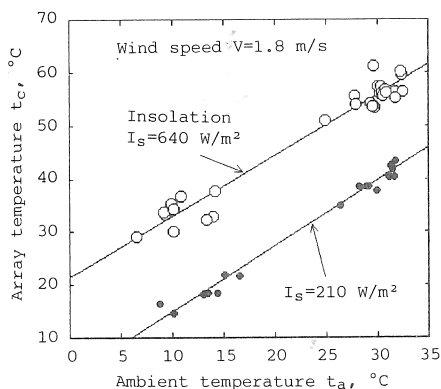


図10 アレイ温度に及ぼす気温の影響

を求めた結果、 $R_s = 0.14 \Omega$, $R_{sh} = 1950 \Omega$, $n = 1.04$, $C_0 = 10$, $E_0 = 1.13 \text{ eV}$ であった。本太陽電池アレイはこのセルが444枚直列なものが14列並列に接続されたものである。 $T = t_c + 273$ として式(1)~(3)を用い、出力電圧が200V一定の時に計算した結果が図5中の実線である。図からわかるようにアレイ発生電力はアレイ温

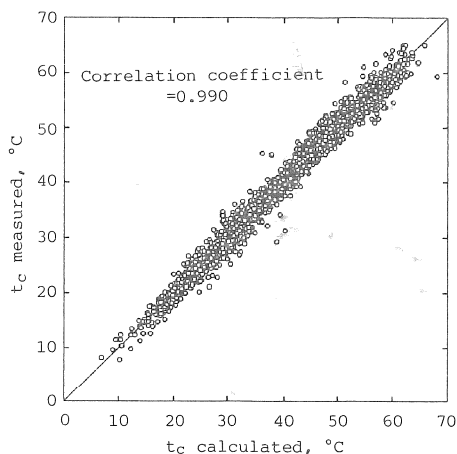


図11 アレイ温度の計算値と実測値の比較

度が一定であれば日射量に対して直線的に増加するが、アレイ温度が上昇すると低下する。600W/m²という同じ日射量でも、太陽電池変換効率はアレイ温度が30℃の時14%、60℃の時9%と大きく異なる。そこで日射量が一定の場合、アレイ発生電力に及ぼすアレイ温度の依存性を示したのが図6である。図中の実線は式(1)~(3)から計算した結果で、測定したアレイ温度 t_c は素子温度と考えてもよいことがわかる。日射量 I_s とアレイ温度 t_c がわかっている場合、出力電圧が200V一定の時の発生電力を式(1)~(3)によって計算した結果と実測値の比較を図7に示す。標準偏差は28Wであり、年間発電量の予測には十分な精度である。

式(1)~(3)からアレイ発生電力を計算するためには素子温度 T がわかっていなければならないが、 T は日射量 I_s と気温 t_a が大きくなると上昇し、風速 V が大きくなると減少する。図8は気温と風速が一定の時、アレイ温度は日射量に対して直線的に大きくなるが、風速が小さいときほどその勾配は大きいことを示している。図9は日射量と気温が一定の時、アレイ温度は風速が大きくなると直線的に小さくなることを示している。また図10は日射量、風速が一定の時、アレイ温度の気温依存性を示している。そこでアレイ温度 t_c は日射量 I_s 、気温 t_a 、風速 V およびそれらの積である $I_s t_a$, $I_s V$, $t_a V$ の6変数の関数として表すことができると考えて多変数解析を行った。そして寄与率の小さい変数から落していき、分散が最大となる重回帰式を求めたところ、アレイ温度 t_c は次式のように表せることがわかった。

$$t_c = a + b I_s + c t_a + d I_s V \quad (4)$$

ここで係数 a, b, c, d は、 $a = -3.0$, $b = 0.0465$, c

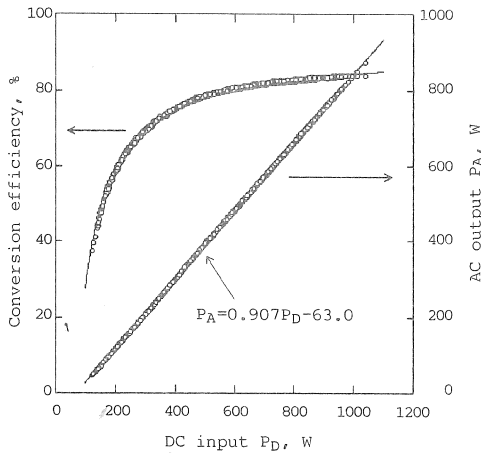


図 1.2 直交流変換器の特性

$=1.16$, $d = -0.00515$ であった。ただし用いたデータの範囲は $7.8 < t_a < 35.1$, $105 < I_s < 806$, $2.1 < t_a < 35.2$, $0 < V < 8.1$ である。この時の式(4)によるアレイ温度の計算値と実測値の比較を図 1.1 に示す。相関係数は 0.99 であり、標準偏差は 1.9°C である。従って日射量、気温、風速が与えられれば式(4)よりアレイ温度が求められ、次に式(1)~(3)よりアレイ発生電力が計算できる。式(4)の係数は太陽電池のパッケージングが異なれば当然違ってくるが、関数形は変わらないと思われる。

3.2 直交流変換器の特性

発生した直流電力は直交流変換器によって交流に変換された後系統電源に帰される。図 1.2 は直交流変換器の直流入力 P_D を横軸に、交流出力 P_A [W] およびインバータ変換効率 P_A / P_D を示したものである。直交流変換器内では 63.0W が制御用電力として消費される。そして P_A は P_D に対して直線的に変化し、次式で表せる。

$$P_A = 0.907 P_D - 63.0 \quad (5)$$

最大変換効率は約 85% である。本変換器の定格出力 2kW に対して、本実験では約 1kW の出力しかないのでやや小さい効率となっている。また本変換器は太陽電池アレイからの直流電圧を感知することによって自動的に起動と停止を行うため、停止後も感知のため 30W の電力を消費するが、後の計算ではこれを無視し手動で起動と停止を行うとして計算した。

3.3 年間供給電力の推定

式(1)~(5)より太陽光発電による系統への一日の供給電力を計算するためには日射量、気温、風速の一日の時間変化がわからなければならない。しかし一般に手に入る気象データは、日射量については水平面日積算日射量であり、気温、風速については一日の平均値で

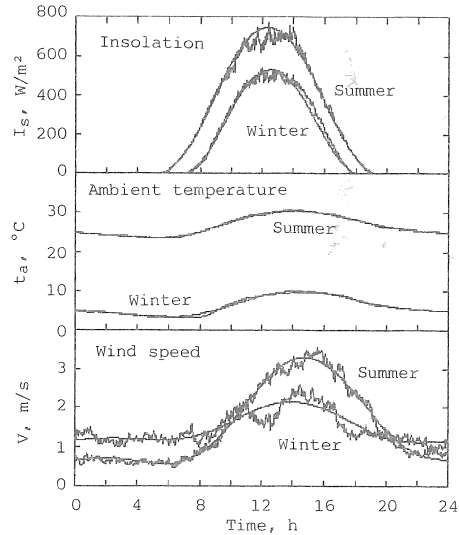


図 1.3 日射量、気温、風速の時間変化

ある。日射量については一日の大気透過率が一定と仮定し、水平面日積算日射量の実測値に合うように大気透過率を求めると、任意の時刻における任意の傾斜面への日射量を求めることができる⁽⁵⁾。しかし気温と風速についての時間変化はわからない。図 1.3 は夏期と冬期における計測結果から、日射量と気温、風速の 1 分ごとの測定値からその時刻における平均値を計算して示したものである。滑らかな線は日射量については大気透過率 P が夏で 0.46、冬で 0.49 として計算より求めたものである。また気温と風速変化における滑らかな線は一日周期と半日周期を考慮した場合のフーリエ解析の結果得られたもので、夏の気温に関しては次式、

$$t_a = t_m - 2.37 \cos(\tau_n) + 0.69 \cos(2\tau_n) - 2.08 \sin(\tau_n) + 0.58 \sin(2\tau_n) \quad (6)$$

冬の気温に関しては次式、

$$t_a = t_m - 1.87 \cos(\tau_n) + 0.62 \cos(2\tau_n) - 2.26 \sin(\tau_n) + 0.81 \sin(2\tau_n) \quad (7)$$

を示しており、また夏の風速に関しては次式、

$$V = V_m - 0.96 \cos(\tau_n) + 0.08 \cos(2\tau_n) - 0.90 \sin(\tau_n) + 0.44 \sin(2\tau_n) \quad (8)$$

冬の風速に関しては次式、

$$V = V_m - 0.41 \cos(\tau_n) + 0.10 \cos(2\tau_n) - 0.20 \sin(\tau_n) + 0.18 \sin(2\tau_n) \quad (9)$$

を表している。ここで t_m , V_m は日平均気温、日平均風速、 $\tau_n = 2\pi\tau/24$ であり、 τ は時刻を表している。 t_m , V_m に平均気象データを用いることにより、それぞれの時間変化が得られる。これら日射量、気温、風速の時間変化は八代における気象データより求めたもの

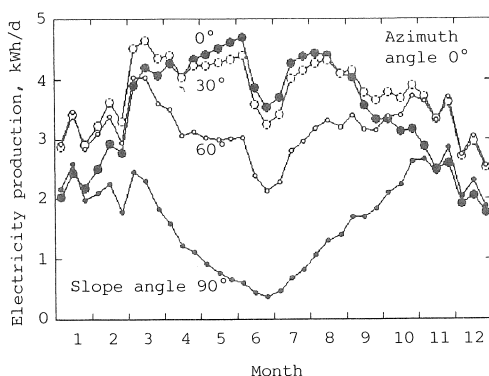


図 1-4 供給電力の月変化

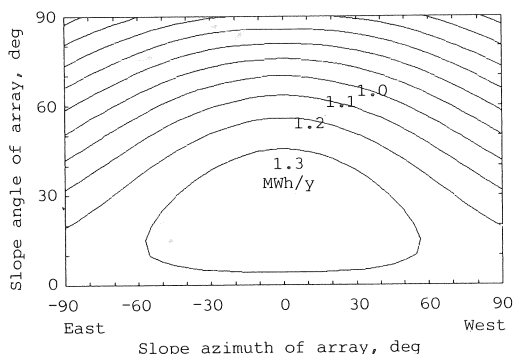


図 1-5 年間供給電力

であるが、これらの変化の特徴は山岳部を除く平野部ではそれほど差はないと思われる。春期、秋期における日変化はそれぞれの係数の平均値を用いた。平均気象データとしては文献(6),(7)を参照し、過去10年間の八代市における各月の上旬、中旬、下旬の平均値36個を用いた。ただし日射量については熊本市における計測値から求めた日平均透過率を用いて計算した。

図 1-4 はこのようにして計算した八代における方位真南、傾斜角 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の太陽電池アレイ（面積 10.5 m^2 ）から系統への月毎の供給電力の変化を示したものである。6月下旬の供給電力の低下は梅雨期の影響を示している。また日照時間を考慮するとアレイからの瞬間最大電力発生は3月に生ずる。図 1-5 は年間供給電力のアレイ傾斜角と方位角による変化を示したものである。これよりアレイの傾斜角が 25° で、方位が真南のとき供給電力は最大となり、 1.38 MWh/y （ $=158\text{ W} \times 365\text{ 日}$ ）が供給できることが推定される。図 1-3 に示すように気温と風速は正午を軸に対称になっていないにもかかわらず、図 1-5 では方位 0° を軸にほとんど左右対称になっている。これは気温の上昇によるアレイ

発生電力の低下と、風速の増大によるアレイ発生電力の増加がちょうど打ち消し合っているためである。建物によってはアレイを真南に設置できない場合もあるが、図 1-5 からわかるように東西 30° の方位の違いによる年間発生電力の相違は小さい。

4. 結 言

本研究は特定の太陽電池と変換器を用い、特定の場所で行った実験結果を基にしているが、得られた結果および計算方法は他の太陽電池および他の場所で太陽光発電システムを計画している場合にも、気象データの日射量、気温、風速の値さえあれば年間、期間の発生電力、供給電力が計算でき参考になるとと思われる。本システムのインバータは出力電圧一定の制御法を用いているが、最大出力点制御法の場合も同じ式を用いて計算できる。計算してみるとその差は年間出力では3%以内であった。得られた主な結果を箇条書きすると

- 1) 太陽電池アレイからの直流発生電力は日射量と太陽電池素子温度がわかれば式(1)~(3)から計算できる。本実験で測定したアレイ温度を素子温度として用いても十分な精度で発生電力を計算できる。
- 2) 本実験で用いた太陽電池ではアレイ温度は日射量、気温、風速の関数として式(4)の形で表せる。
- 3) 式(1)~(5)と平均気象データを用いて年間供給電力の予測ができる。

謝 辞

本研究は昭和63年度、および平成元年度文部省科学研究費補助金（重点領域研究、太陽エネルギーの資源化に関する研究、代表者、九州大学、藤井 哲 教授）によりなされたものであることを記して謝意を表する。

文 献

- (1) 前田満・三田村柱一・高橋宏郎・一ノ倉理・村上孝一、太陽光発電システム用直交磁心形DC-AC変換器の開発、日本太陽エネルギー学会第13回研究発表会講演論文集(1987-12)、29、三重。
- (2) 三田村柱一・前田満・高橋宏郎、系統連系太陽光発電用多機能高周波PWMインバータの開発、日本太陽エネルギー学会第13回研究発表会講演論文集(1987-12)、33、三重。
- (3) 白石知男・萩原義也・徳田憲昭・栗尾伸広、2kW家庭用太陽光インバータ、日新電機技報、33-79(1988)、79。
- (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(1989)、38。
- (5) 田中俊六、太陽熱冷暖房システム(1977)、オーム社、東京。
- (6) 気象庁、熊本県版農業気象10年報（昭和42年～昭和51年）、気象庁。
- (7) 気象庁、熊本県気象月報（昭和55年～平成元年）、熊本地方気象台。