

多面アレイ構造太陽光発電システムに対応したシミュレーション・ツールの開発

学生員 松川 洋*† 非会員 山田 隆夫**
非会員 塩谷 正樹*** 正員 黒川 浩助*

Development of simulation tool for photovoltaic systems with several surface arrays

Hiroshi Matsukawa*, student member, Takao Yamada**, member, Masaki Shioya***, Non-member, Kosuke Kurokawa*, member

This paper will principally describe about the PV array simulation tool. This PV array simulation tool is available to estimate the output power of the PV array with difference azimuth and orientation for the maximum of four surfaces. This tool analyses the daily, monthly or annual output power with high accuracy because of using the I-V characteristic. The analysis is based on simplified I-V curve interpolation considering the characteristics of each module in the PV array. The shortest interval time of calculation is one second.

キーワード：太陽光発電システム，シミュレーション

Keywords : photovoltaic system, simulation

1. はじめに

近年の太陽光発電（PV）システムの導入数増加に伴い、複数の屋根面を利用した住宅用 PV システムが増加している。今後もより複雑な設置面に対する導入の要望があることは間違いない。複数の面に PV アレイを設置した場合、各面の入射日射量の違いから面ごとの発電量が異なり、 mismatch 損失を生じ、最大電力点追尾制御（MPPT）も困難になる恐れがある。PV システムを導入する事前に最適な設置形態を把握することが重要である。そのために、様々な設置形態に対応し、年間発電量の推定が可能なシミュレーション・ツールの開発が不可欠である。しかし、現状では、平易なシステムにおける手法は確立しているものの^{[1][2]}、異方位、異傾斜面の混在したシステムや、日陰に関する詳細な解析が行えるシミュレーションは殆ど見あたらない。また、計算精度だけでなく太陽光発電システムの設計時に多

くの人が利用できるユーザ・インターフェイスまで兼ね備えた設計ツールは少ない。

本論文では、縮小モデルによる検証実験によりシミュレーション・モデルの有効性を確認した上で、複数の PV アレイを持つ住宅用システムについて、実測データを用いた実証評価を行った。本手法は、それぞれの PV モジュールの電流電圧特性（I-V 特性）を模擬し、詳細な解析を行っているため精度も高く、将来的には日陰やコンバータによる損失も詳細に解析が可能であり拡張性が非常に高い。

2. シミュレーション手法

本手法は、システム内に存在する全てのモジュール 1 枚ごとの I-V 特性を算出しているため、複数の設置面を持ち方位角や傾斜角の混在するシステムであっても、その出力特性を求めることが可能である。また、システム全体の I-V 特性も推定できるため、インバータ等の周辺機器の影響も考慮することが可能である^[3]。さらに、日陰のかかる位置が求められれば、その損失を求めることも容易となる。

本手法におけるシミュレーション・ツールのフローチャートを図 1 に示す。各モジュールの I-V 特性を日射強度とモジュール温度から算出し、モジュールの配線構成に応じてアレイ出力を求める。なお、このシミュレーション・ツールでは 4 つの異なる設置面の混在するシステムに対応している。モジュールごとの変動パラメータは、日射強度、モジュール温度となり、時系列の日射強度・モジュール温度

* 東京農工大学 工学研究科 電子情報工学専攻
〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16
Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo 184-8588

** 日本品質保証機構
〒107-0052 東京都港区赤坂 1-9-15
Japan Quality Assurance Organization
1-9-15, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107-0052

*** 鹿島建設株式会社 技術研究所
〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1
Kajima Technical Research Institute
2-19-1, Tobitakyu, Chofu, Tokyo, 182-0036

† 株式会社資源総合システムにも所属する

データに対してそれぞれ I-V 特性の算出を行い、アレイ出力を求めることができる。これらのデータを積算することで、時積算、日積算、月積算、年積算の各値が推定できる。

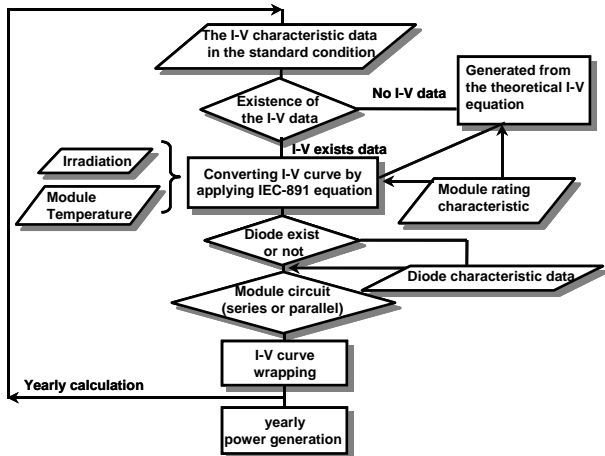


図1 シミュレーション・モデルのフローチャート
Fig.1 The flowchart of the simulation model

〈2・1〉 特性式による I-V 特性の算出 最初に標準状態におけるモジュールの I-V 特性を必要とするが、データがない場合には、モジュールの定格パラメータを用いて 1 ダイオードモデルの太陽電池の基本式 (式(1)) から生成することも可能である^[4]。

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[\exp \left\{ q \left(\frac{V + R_s \cdot I}{m n k T} \right) \right\} - 1 \right] - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \dots\dots\dots (1)$$

- ここで、
- I : 出力電流 [A]
 - V : 出力電圧 [V]
 - I_{ph} : 光起電流 [A]
 - I_0 : ダイオード飽和電流 [V]
 - R_s : 内部直列抵抗 [W]
 - k : ボルツマン定数 (= 1.38×10^{-23}) [J]
 - q : 電子の電荷量 (= 1.60×10^{-19}) [C]
 - n : ダイオード因子
 - T : セル温度 [K]
 - R_{sh} : 並列抵抗 [W]
 - m : セル枚数 [枚]

式(1)より、ニュートンラプソン法による収束計算を行うことで、任意の I-V 特性を算出することが可能となる。これらの太陽電池特性式の各係数は、式(2)～式(5)に示すとおり温度依存性を持つ^[5]。

$$I_{ph} = I_{ph0} \left\{ 1 + 7.9736 \times 10^{-4} \cdot (T_c - 25) \right\} \times [0.94Ga + 0.06\{1 - \exp(-8Ga)\}] \dots\dots\dots (2)$$

$$I_0 = I_{00} \cdot \exp\{0.14132 \cdot (T_c - 25)\} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_s = R_{s0} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 3.4158 \times 10^{-3} \cdot (T_c - 25) \\ + 2.5324 \times 10^{-5} \cdot (T_c - 25)^2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 4.4490 \times 10^{-2} \cdot (T_c - 25) \\ - 8.0575 \times 10^{-4} \cdot (T_c - 25)^2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

- ここで、
- G_a : 日射強度 [kW/m²]
 - I_{ph0} : 基準状態におけるモジュールの光起電流 [A]
 - I_{00} : 基準状態におけるモジュールの飽和電流 [A]
 - R_{s0} : 基準状態によるモジュールの直列抵抗 [A]
 - R_{sh0} : 基準状態におけるモジュールの並列抵抗 [A]
 - T_c : モジュール温度 [°C]

〈2・2〉 JISC 8913 換算式による I-V 特性推定法 外部から数値データとして取り込まれたもしくは特性式から発生させた I-V 特性データを“基準状態”データとして、これを基に各モジュール温度・日射状態における I-V 特性を推定する。その推定には、以下の式を用いた。この換算式は、IEC 規格 (International Electrotechnical Commission : 国際電気標準機関) 及び JIS (日本工業規格) に制定されている^[6]。

電流 :

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left(\frac{E_2}{E_1} - 1 \right) + \alpha(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (6)$$

電圧 :

$$V_2 = V_1 + \beta(T_2 - T_1) - R_s(I_1 - I_2) - K \cdot I_2(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (7)$$

- V_{oc} : 開放電圧 [V]
- I_{sc} : 短絡電流 [A]
- α : 電流の温度係数 [A/°C]
- β : 電圧の温度係数 [V/°C]
- K : 曲線補正因子 [Ω/°C]

この手法は、電流は日射強度に依存し、電圧はモジュール温度に依存することを前提に求められた式である。日射強度 700[W/m²]以下における規格においては、計算精度は保証されていないが、最終的に年間出力を推定することを目的としているため、年間である程度均されることを想定し、全ての日射強度領域において上記の式を用いた。なお、日射強度 100[W/m²]以下はインバータが停止していると仮定している。

〈2・3〉 I-V 特性の合成法 本シミュレーションでは、モジュール1枚ごとの I-V カーブが算出されることを前提としている。それらの I-V カーブを、回路構成に従って作図的に合成する。ここでは、この手法を“I-V カーブの重ね合わせ法”と呼ぶ^[7]。

システム全体の出力特性を知るために、各モジュールの I-V 特性を合成する方法について述べる。太陽光発電システムの回路内には、逆電圧防止や逆流防止のためにブロッキングダイオードやバイパスダイオードが挿入される。本シミュレーション・モデルでは、これらのダイオードの特性も考慮に入れ模擬することが可能である。I-V カーブを合成していく過程では、回路の構成に従って作図的に I-V カーブ

を重ね合わせていくことで求めることが可能である。この手法では、単純に回路構成に従った I-V カーブの重ね合わせを行うため、比較的正確かつ高速に計算できることが特徴である。図 2 は 2 枚のモジュールを直列に接続し、バイパスダイオードを挿入していない場合である。電圧軸方向に加算していく。計算する際に第 2 象限まで考慮する必要があることが特徴的である。また、電流軸方向で損失が出ているのが分かる。図 3 は同様に 2 枚のモジュールを直列に接続し、バイパスダイオードを挿入した場合である。段差のある I-V カーブとなる。配列に接続した場合も、電流軸方向で同様な考え方をする。シミュレーションでは同様の計算を繰り返す。

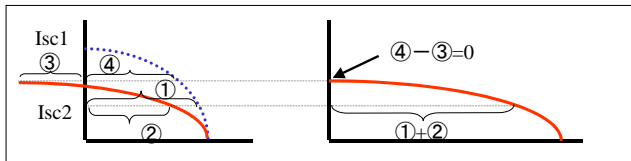


図 2 バイパスダイオードがない場合
Fig.2 Case of not exist bypass diode

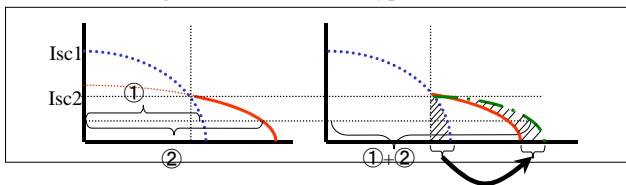


図 3 バイパスダイオードのある場合
Fig.3 Case of exist bypass diode

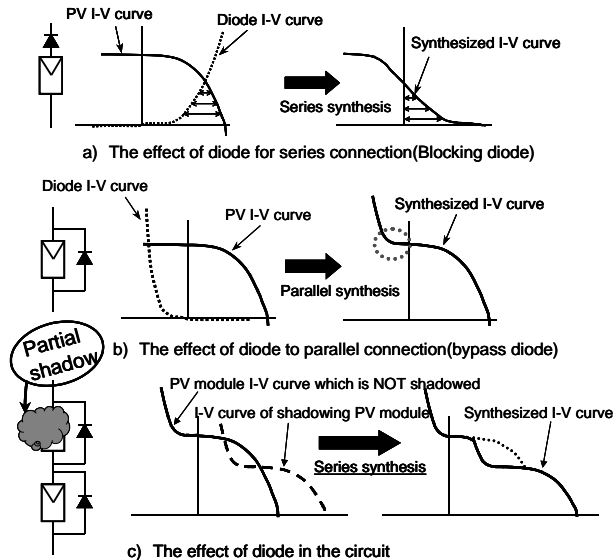


図 4 ダイオードの影響
Fig.4 The influence on diodes for 2cell module

〈2・4〉 ダイオードの影響 モジュールの出力が低電圧・小電流領域では、ダイオードの影響が生じる。通常のシステムでは、ダイオードの影響はさわめて小さいので無

視されることが多いが、実際は図 4 に示すように出力特性に対して影響を与えていると考えられるため、ここではこれらの影響も考慮した。図 4 はバイパスダイオードとブロッキングダイオードの影響である。

ダイオードをモジュールと直列に接続した場合つまりブロッキングダイオードの場合、ダイオードの I-V 特性の影響で、太陽電池の I-V 特性が潰れた形となり、大きな損失を与える (図 4.a)。一方、ダイオードをモジュールと並列に接続した場合つまりバイパスダイオードとして用いた場合、電圧が負の領域にダイオード特性が現れる (図 4.b)。さらに、バイパスダイオードの挿入されているモジュールを直列に接続した場合、ダイオードの順方向電圧が影響して損失を生じる可能性がある (図 4.c)。

通常のモジュールの出力と比べるとダイオードの影響は相対的には小さいが、大規模のシステムの場合多くのダイオードが組み込まれていることが考えられ、その損失は無視できない量となることが考えられる。

〈2・5〉 I-Vカーブ合成ロジック シミュレーション上での I-V カーブ合成の際に用いられる場合分けを表 1 に示す。表 1 のようにダイオードの有無によって場合分けをする。そのため、ダイオードの合成ルーチンは以下の 4 パターンとなる。

- 直列合成
 - ・バイパスダイオード有り直列合成
 - ・バイパスダイオード無し直列合成
- 並列合成
 - ・ブロッキングダイオード有り並列合成
 - ・ブロッキングダイオード無し並列合成

表1 ダイオードによる場合分け

	Bypass diode	Blocking diode
Case 1	none	none
Case 2	exist	none
Case 3	none	exist
Case 4	exist	exist

〈2・6〉 モジュール温度推定 日射量と同時にモジュール温度や気温を測定しているとは限らず、日射量からモジュール温度を推定する必要が生じる。また、本シミュレーションソフトは気象データベースである「全国 150 地点における時積算傾斜面日射量データ」(METPV) [8]に対応しているが、このような気象データベースを利用する場合も、モジュールの温度の推定が必要となる。モジュール温度の推定には式(8)及び式(9)に示す Roof 型アレイの温度上昇推定を用いた[9]。METPV からは、日射強度、周辺温度、風速の各パラメータを利用した。

$$T_{CR} = T_A + \Delta T \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta T = (-6.036 + 0.274 \cdot W + 0.071 \cdot W^2) + H \cdot (45.63 - 5.91 \cdot W + 0.333 \cdot W^2) \quad \dots (9)$$

T_{CR} : モジュール温度 [°C]
 T_A : 周辺温度 (気温) [°C]
 ΔT : モジュール温度上昇 [°C]
 W : 風速 [m/s]
 H : 全天日射量 [kW/m²]

〈2・7〉 傾斜面日射量の推定 実測データを用いる場合、水平面全天日射量のみしか測定されていない場合が多い。また、設置面が複数混在するシステムを扱う場合、全ての面の傾斜面日射量が測定されているとは限らない。そこで、Erbsらの手法^[10]を用いて水平面全天日射量から傾斜面日射量を推定する。Erbsらの手法を以下に示す。

全天日射量は、直達成分と散乱成分の和であり、これらをそれぞれの成分に分離（直散分離）し、傾斜面分を推定して合成する。

$$H = H_d + H_b = H_d + I \sin h_s \quad \dots (10)$$

$H/H_0 < 0.22$ のとき

$$\frac{H_d}{H} = 1.0 - 0.09 \frac{H}{H_0} \quad \dots (11)$$

$0.22 < H/H_0 \leq 0.80$ のとき

$$\frac{H_d}{H} = 0.9511 - 0.1604 \frac{H}{H_0} + 4.388 \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 - 16.638 \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 + 12.366 \left(\frac{H}{H_0}\right)^4 \quad \dots (12)$$

$H/H_0 > 0.80$ のとき

$$\frac{H_d}{H} = 0.165 \quad \dots (13)$$

H_0 : 大気外水平面日射量 [kW/m²]
 H_d : 水平面散乱日射量 [kW/m²]
 H_b : 水平面直達日射量 [kW/m²]
 I : 法線面直達日射量 [kW/m²]
 h_s : 太陽高度 [rad]

式(14)~(17)より、直達・反射および散乱成分の傾斜面日射量を求められる^[10]。

$$h_b : \text{傾斜面直達日射量} = H_b \times \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad \dots (14)$$

$$h_r : \text{傾斜面反射日射量} = H \times p \times \frac{1 - \cos \theta_a}{2} \quad \dots (15)$$

$$h_d : \text{傾斜面散乱日射量} = H_d \times \frac{1 + \cos \theta_a}{2} \quad \dots (16)$$

θ_a : アレイの傾斜角 [rad]
 p : アルベド [%]
 θ_z : 天頂角 [rad]
 θ : 入射角 [rad]

従って、傾斜面日射量 h [kWh/m²] は、

$$h = h_b + h_r + h_d \quad \dots (17)$$

となる。

3. 縮小モデルによる検証

ここでは、実システムと電気的に等価な縮小モデル実験により、“I-V カーブの重ね合わせ法”を用いたシミュレーションの精度検証と、太陽電池アレイに生じる部分日陰が発電特性に及ぼす影響を評価した^[7]。

〈3・1〉 縮小モデル実験の概要 太陽光発電システムの出力特性を把握するには、実際のシステムを利用して測定するのが最も妥当であると思われる。しかし、日陰などの影響による特性の測定、あるいは配線による影響を評価するには、実在するシステムでは困難な点が多い事に加え、再現性が非常に乏しい。そこで、本稿では、アレイの縮小モデルを想定し、小型のモジュール(以下“2分割セルモジュール”と呼ぶ)を用いて数多くのパターンの実験を試みた。

本手法の特徴は、以下に挙げられる。

- ・実験が極めて簡便である
- ・回路の組み替え(直並列配線やダイオード挿入など)が容易である
- ・陰の模擬が容易である
- ・あらゆる設置形態を想定した模擬が容易となる
- ・ソーラシミュレータを使った屋内実験が可能である

なお実験は、鹿島建設技術研究所西調布実験場で行った。図5にその実験回路を示す。

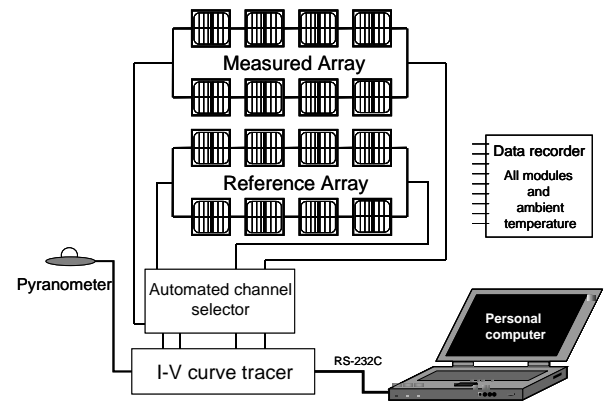


図5 実験回路

Fig.5 Experimental circuit

アレイの基本構成は、モジュール4直列2並列とした。各モジュールには熱電対が装着されており、マルチレコーダで全ての2分割セルモジュールの温度及び、大気温度を測定することが可能である。また、セル測定用の電子負荷式I-Vカーブトレーサを用い、各アレイの出力特性を測定できる。日射強度は、サーモパイル型日射計(EKO MS-801)で計測した。I-Vカーブトレーサの制御はパソコンにて行っている。さらに、配線の変更やバイパスダイオード(BPD)、ブロッキングダイオード(BLD)の挿入も容易にできる構

造になっている。

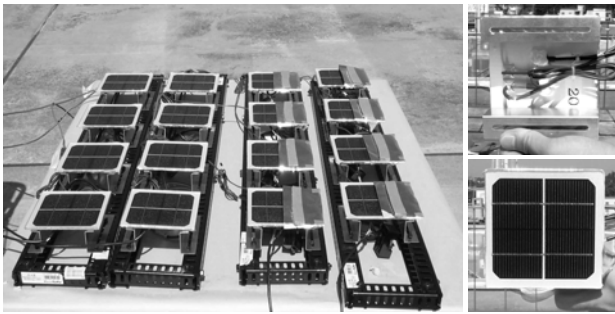


図 6 実験装置と 2 分割セルモジュール
Fig.6 Experimental device and Mini-module consisting of two-cells

図 6 に実験装置と実験に用いた 2 分割セルモジュールを示す。図 6 に示すようにカバーでセルを覆うことで、数々のパターンの日陰パターンを模擬している。

実験に用いた 2 分割セルモジュールは、1 枚のセルを 2 つに割り、直列接続させたモジュールを用いた。これは、単セル面積で 2 倍の電圧を得るためである。電圧が低いと、相対的にダイオードの損失が大きくなるため、少しでも高い電圧が必要となる。表 2 に 2 分割セルモジュールの定格を示す。

表 2 2 分割セルモジュールの定格

Table 2 Rated values of PV module

Parameters	Rated Value
V_{oc}	1.20 [V]
I_{sc}	1.95 [A]
P_{max}	1.65 [W]
V_{Fmax}	0.95 [V]
I_{Fmax}	1.75 [A]
R_s	0.08 [Ω]
K	0.001[$\Omega/^{\circ}C$]
α	0.001[A/ $^{\circ}C$]
β	0.004[V/ $^{\circ}C$]

また、測定回路内に入れるダイオードには、順方向電圧降下の少ない、ショットキーバリア・ダイオードを用いた。

〈3・2〉ダイオードの影響評価実験 今回実験に用いたような縮小モデル実験の場合、ストリングの電圧が低くなり、相対的にダイオードの順方向電圧降下の占める割合が大きくなる。そのため、ダイオードの及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。そこで、普通の整流用シリコンダイオードと、今回実験に用いたショットキーバリア・ダイオードに関して、接続する太陽電池の枚数を変動させ実験を行った。結果を図 7 に示す。ここで、最大電力量を P_{max} とした時の出力比及び順方向電圧降下率を式(18)に定義する。

$$\begin{aligned} \text{※出力比 (Output ratio)} &= \frac{\text{ダイオードが挿入されている場合の } P_{max}}{\text{ダイオードが無い場合の } P_{max}} \dots\dots(18) \\ \text{※順方向電圧降下率 (Forward voltage drop ratio)} &= \frac{\text{ダイオードの順方向電圧降下}}{\text{ダイオードに接続されたモジュールの定格最大出力}} = V_{FM} / 2V_{Fmax} \end{aligned}$$

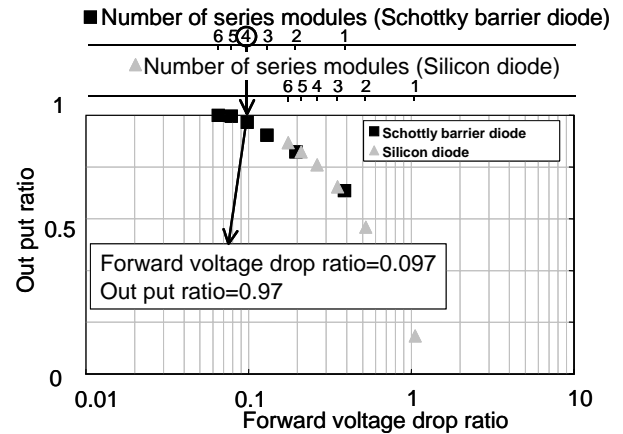


図 7 ダイオードの影響評価実験

Fig.7 Experimental result of diode influence

図 7 から、直列ストリングの電圧に占めるダイオードの順方向電圧降下の割合が下がるに従って、ダイオードの影響が殆どなくなっていることが分かる。順方向電圧降下率 9.7% のとき、出力比は 97% を越えている。実験に使用した 2 分割セルモジュールとショットキーバリア・ダイオードの場合、4 枚直列に接続した場合に相当する。よって、順方向電圧降下率が 10% 程度以下である限り、ダイオードの影響はほぼ無視できると考えられ、先に述べたアレイの縮小化モデルを用いて実験しても、電気的特性上の問題はないと言える。つまり、ショットキーバリアを用いた場合は 2 分割セルモジュールを 4 枚直列、シリコンダイオードであれば 11 枚直列に接続した場合、ブロッキングダイオードの影響を考慮する必要がない。そのため本実験で用いたダイオードは、全てショットキーバリア・ダイオードとした。

また、この縮小モデル実験においてバイパスダイオードとしてもショットキーバリア・ダイオードを用いることに問題がないことを確認した。

〈3・3〉シミュレーションの精度検証 図 8 に実測値とシミュレーションの比較及び、その測定回路を示す。

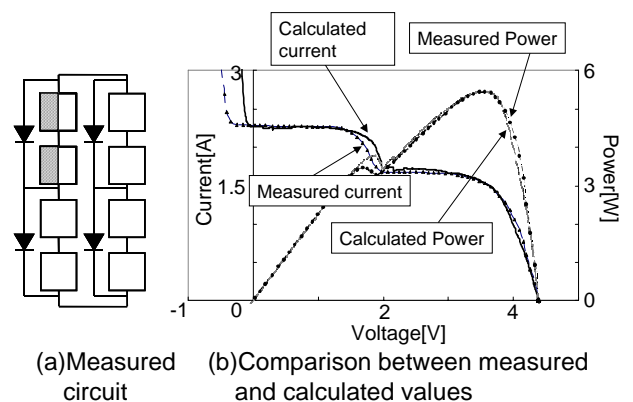


図 8 シミュレーション結果と実験値の比較
Fig.8 Comparing of simulated and measured data

測定回路は、図 8 に示すように 2 分割セルモジュールのうち 2 枚をそれぞれ半分陰としたものである。なお、陰は

全陰で 2 分割セルモジュール内にある 2 枚のセルを横断する形でかけたものである。グラフからも分かるが、最大電力点における誤差率がわずか 0.3%程度であり、極めて精度の高いシミュレーションであると言える。

〈3・4〉 理論式による数値解法との比較 実測との比較の他に、異なるシミュレーション手法である「理論式による数値解法」とも比較を行った。この手法は、式(1)に示す太陽電池における等価回路の基本式を使い、各係数を求め、非線形の連立方程式を解くことで解析的に求めていくものであり、理論的な値を算出することができる。

この手法は、解析的に厳密な計算が可能であるが、規模が大きくなるにつれて計算量が増加するため、計算速度の点に問題が残る。

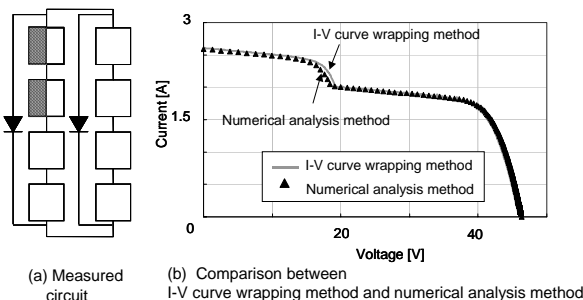


図 9 「I-V カーブの重ね合わせ法」と「理論式による数値解法」の比較

Fig.9 Comparison between “I-V curve wrapping method” and numerical analysis method

図 9 に「I-V カーブの重ね合わせ法」と「理論式による数値解法」それぞれのシミュレーション手法による比較を示す。図 9 から「理論式による数値計算法」と比較しても非常に精度が良いことが分かる。「I-V カーブの重ね合わせ法」であっても、計算が簡易的であるにもかかわらず、十分な精度が得られる。つまり、I-V カーブ直並列重ね合わせによる基本モデルは非線形回路モデルの数値解法と同様の精度を持つが、さらに計算数等小さく、解収束上の問題もないことから、大規模アレイ回路網には今回モデルのみが適用可能であると言える。

4. シミュレーション・ツール

これまで述べてきた推定手法を用いて、GUI に対応した実用レベルのツール開発を行った。その概要を述べる。

〈4・1〉 ソフトウェアの概要 開発したシミュレーション・ツールは、モジュールごとの出力を推定するため、複数の方位や傾斜面にアレイが設置されたシステムの推定が可能で、日陰の影響なども模擬できる。

最初に、モジュール定格のパラメータ及び基準となる I-V カーブを入力する。基準 I-V カーブの数値データが存在しない場合、式(1)を用いて入力パラメータから生成することが可能である。最大 4 面までの傾斜角・方位角の異なるアレイが指定可能で、それぞれの傾斜角・方位角・モジュール

枚数を指定することができる。アレイの直列枚数と並列枚数および、バイパスダイオードブロッキングダイオードの有無を設定する。ブロッキングダイオードは、1 モジュールあたり 1 個、バイパスダイオードは 1 スtring あたり 1 個、挿入されることとなる。モジュールの合計は、10 直列×10 並列で 99 枚まで指定できる。気象データとして、METPV 及び実測データの利用が可能である。計算結果は、最大で 1 分値を 1 年分出力することが可能である。また、1 秒値の出力も可能である。ソフトウェア画面の一例を図 10 に示す。



図 10 ソフトウェアの画面の例
Fig.10 Example of software window

5. 住宅用 PV システムによる検証

シミュレーション・ソフトウェアの検証のために、「住宅用太陽光発電システム (全国 100 箇所) の運転データ収集・評価プロジェクト」として定常的にデータ収集を行っているサイトのデータを用いた。その中で、東西南北の 4 面にアレイを持つ滋賀県守山市の ST013 サイトを選択し、検証に用いた。

〈5・1〉 住宅用 PV システムの概要 設置環境は、閑静な住宅街の中にあり周囲に高い建物はなく影による発電量の低下は考えられない。傾斜角は 21.8° でありモジュール面の汚れは雨水で充分洗い流される角度である。アレイの配置は寄せ棟の 4 面とも同様である。モジュールの設置方位角は、北を 0° ・東をプラスとして、 48° 、 138° 、 228° 、 318° である。日射計及び温度計は、方位角 228° (南西) に設置している。各方位のアレイは、接続箱で並列に接続され 4.5kW のインバータを通して、商用系統に連系されている。寄せ棟屋根の外観上の考慮から、1 面あたりの構成は 140W の方形モジュール 4 枚と 70W の多角形モジュール 4 枚の配置となっている。ここでは、多角形モジュール 2 枚で 140W 方形モジュール 1 枚とみなし、1 面あたり 140W モジュール 6 直列、4 面で 4 並列の構成として計算している。インバータは 4.50kW で十分な容量を持っている。システム仕様を表 3 に示す。多角形モジュールの仕様は方形モジュールのほぼ半分となっており、多角形モジュール 2 枚を方

形モジュールとみなしても計算上はほぼ問題ないと考えられる。

表 3 システム概要

Table 3 Outline of housing PV system

Locate	滋賀県守山市 (Moriyama-city Shiga pref.) (Lat. 35.0° N, long. 136.0° E)
Installed capacity	3,360W
Configuration of modules	6 series, 4 parallels
Inverter	GS LBSC-4.5S3C DC-IN118V AC-OUT202V 4,500kVA
Array tilt angle	21.8°
Array azimuth angle	48°, 138°, 228°, 318° (north: 0°, east plus)
Pyrheliometer	Horizontal and Inclined (azimuth: 228° tilt: 21.8°)
Modules	Single crystal silicon, GS AP-140G×16 and AP-70GD×16

〈5・2〉 シミュレーションの検証結果 ここでは、シミュレーション・ツールにより求めた推定値と、住宅用フィールドテストデータの測定値との検証結果について述べる。アレイ出力の推定には、これまで述べてきたように、まず各面の傾斜面日射量を求め各モジュールの日射量を定義し、それをもとに I-V カーブの合成計算を行う。表 4 に年積算における推定値と実測値の比較を示す。1 年間の積算により、誤差率は 2.9% と良い精度を示している。

表 4 アレイ出力の実測値と推定値の比較

Table 4 Measured and simulated array output

	Measured	Simulated	Error rate
Array output (yearly)	3,172.3 [kWh]	3,266.4 [kWh]	2.9[%]

図 11 に月積算におけるアレイ出力の実測と推定の比較を示す。最も推定精度の悪い 2 月でも 13% の誤差率で、比較的良い精度で推定可能である。

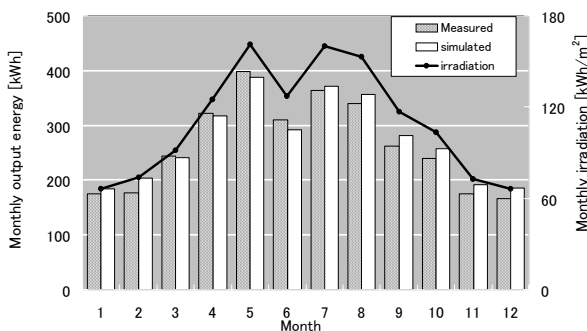


図 11 実測とシミュレーションの比較

Fig.11 Measured and simulated output energy

図 11 に示すように月によって推定精度がばらつく原因は、まず前述の通り、この地方は冬に比較的多くの雪が降るため降雪の際に、アレイの一部を雪が被覆しているが日射計は雪に覆われていないケースが想定できる。その場合、アレイ出力は低下する。また、このシステムではモジュール

ル温度は方位角 228° (南西)のみ測定しており、他の面は日射量から推定していることから、この温度推定の誤差も考えられる。

6.まとめ

本研究では、I-V 特性を利用した、詳細かつ簡易的で操作性も高いシミュレーション・ツールを開発し、高い精度で推定ができることを確認した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 太陽光発電システムの回路内に直並列に挿入されるダイオードと太陽電池の出力特性の相互関係を明確にしたことにより、ダイオードにより生じる損失を明らかにした。
- (2) 太陽光発電システムの縮小モデル実験システムを構築し、ダイオードの影響を考慮した上で、実際のシステムと等価であることを確認した。この実験システムを用いて各種の実験を行い、部分日陰や異方位、異傾斜角の混在する条件での太陽電池の出力特性を明らかにした。また、シミュレーション・モデルの検証を行い、精度の高い推定が可能であることを確認した。
- (3) ユーザ・インターフェイスに優れた太陽光発電システム・シミュレーション・ツールを作成した。このツールは、太陽電池やダイオードの I-V 特性の取り込みが可能で最大 4 面までの多面アレイに対応でき、任意の気象データの取得も可能で高精度の推定が可能である。
- (4) 住宅用太陽光発電システムの実測データと比較検証し、精度の高いシミュレーションが可能であることを確認した。

以上の結果から、より精度及び汎用性の高いシミュレーション・ツールが構築できたと考える。

(平成 13 年 1 月 1 日受付, 平成 14 年 1 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 山本, 伊賀, 石原, 三田, 鈴木: 「I-V カーブ作成法を用いた太陽光発電シミュレーションプログラムの開発」, 電学論 D, 115 巻 6 号 (1995)
- (2) 石原好之: 「太陽光発電システムの運転シミュレーション」, 電学論 C, 115 巻 1 号 (1995)
- (3) 輿石浩吉, 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, p.7-151 (2001)
- (4) 黒川・若松: 「太陽光発電システム設計ガイドブック」, オーム社, p.55 (1994)
- (5) 渡辺耕一郎, 廣瀬雅己, 原田和郎, 石原好之, 戸高敏之: 「日陰を考慮した発電推定法に関する検討」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1998)
- (6) JIS C 8913:1998 「結晶系太陽電池セルの出力測定方法」, 日本工業標準調査会 (1998)
- (7) 松川, 塩谷, 山田, 杉浦, 黒川: 「建築設計のための太陽電池アレイシミュレーション手法に関する検討」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1999)
- (8) 板垣, 岡本, 服部, 山田, 飯田: 「全国 150 地点における時積算傾斜面日射量データ(METPV)の整備」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (1998)
- (9) 西川: 「スタンドオフ型アレイの太陽電池温度特性」, 太陽/風力エネ

- (10) 日本太陽エネルギー学会刊:「新太陽エネルギー利用ハンドブック」,
p.21-30

松川 洋



(学生員) 1977年3月25日生まれ。2001年3月東京農工大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。同年4月株式会社資源総合システム入社。2002年4月、東京農工大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程に在職のまま入学。現在、太陽光発電事業支援部研究員。また、同課程において太陽光発電システムの運転解析および最適設計の研究に従事。日本太陽エネルギー学会会員、日本建築学会会員。

山田 隆夫



(非会員) 1960年6月28日生まれ。1982年3月日本大学理工学部電子工学科卒業。1992年1月財団法人機械電子検査検定協会浜松ソーラーエネルギー研究所入所(現日本品質保証機構)1992年7月太陽光発電システム研究課に所属、太陽光発電システムの評価技術の研究開発に従事。2001年7月財団法人電気安全環境研究所研究部太陽光発電システムグループに出向、現在に至る。

塩谷 正樹



(非会員) 1957年2月14日生まれ。1982年3月早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻修了。同年4月鹿島建設株式会社入社。現在、同技術研究所建築技術研究部居住環境グループ主管研究員。博士(工学)、技術士(衛生工学部門)、一級建築士、建築設備士。日本建築学会会員、空気調和衛生工学会会員。お茶の水女子大学非常勤講師。

黒川 浩助



(正員) 1942年8月16日生まれ。1965年3月早稲田大学第一理工学部電子工学科卒業。同年4月通産省工業技術院電気試験所(現産業技術総合研究所)入所。電子技術総合研究所エネルギー情報技術研究室長などを経て1996年4月東京農工大学工学部教授、現在に至る。工学博士。日本太陽エネルギー学会理事、国際太陽エネルギー学会会員。