

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

～ I-V カーブ合成法の検討と単セルモジュールを用いたアレイ実験による日影損失分析～

学生会員 松川 洋 (東京農工大学)
会 員 山田 隆夫 (日本品質保証機構)
会 員 黒川 浩助 (東京農工大学)

会 員 塩谷 正樹 (鹿島建設)
会 員 杉浦 忠敏 (日本品質保証機構)

Investigation of Photovoltaic Array Simulation Method for Architecture

Hiroshi Matsukawa*, Masaki Shioya**, Takao Yamada***
Tadatoshi Sugiura*** and Kosuke Kurokawa*

*Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588, JAPAN
Fax: +81-42-385-6729, E-mail: hmatsu@cc.tuat.ac.jp

**KAJIMA Technical Research Institute.

***Japan Quality Assurance Organization/JQA Solar Techno-center

Abstract

The inhomogeneity of photovoltaic (PV) array such as partial shadowing due to architectural design are critical issues on PV power generation. However, losses due to the inhomogeneity haven't been analyzed quantitatively enough. The authors developed a simple experimental method using miniature PV array for annualizing the relation between power outputs and shading patterns. The method for wrapping I-V curves was improved and verified. The simulation using this new method provided I-V curves with considerable accuracy, and the estimation errors of the maximum power of the array were within 0.3%.

1. はじめに

近年、太陽光発電システムがより多くの場所に設置されるようになった。それに伴い、太陽電池アレイの一部に日陰が生じたり、同一システム内で複数の異なる傾斜角や方位角を持つ、複雑な形状の太陽光発電システムがたびたび見られるようになった。このようなシステムでは、アレイ内の個々のモジュールごとに、出力が異なるためモジュールの配線方法によっては、アレイミスマッチ損失が生じ、最大電力点追尾制御(MPPT)も困難になることがある⁽¹⁾。しかし、現状ではこれらの損失の有効な解決方法となるような指針は提案されていない。それに加え、損失の詳細な解析もなされていない。特に、建築設計に当たって、統合的な性能評価を行える設計支援手法の開発が望まれている。

そこで本研究では、太陽電池の電気的特性を模擬するための、簡易的な「I-Vカーブの重ね合わせ法」によるシミュレーション手法を確立した。このシミュレーションの検証には、アレイを縮小化したモデルを使い多数のパ

ターンによる実験結果を用いた。しかし、縮小化した際図1に示すように、低電圧・小電流領域では、逆電圧や逆流防止のために入れるダイオードの影響が生じる。そのため、縮小モデルが電氣的に、実際のシステムと等価となるよう、低電圧・小電流領域におけるダイオードの影響を定量的に把握することで、この実験手法の妥当性を評価した。この「縮小化モデル実験」では、日影の出力特性に及ぼす影響を把握した。さらに、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」と照らし合わせ評価した。

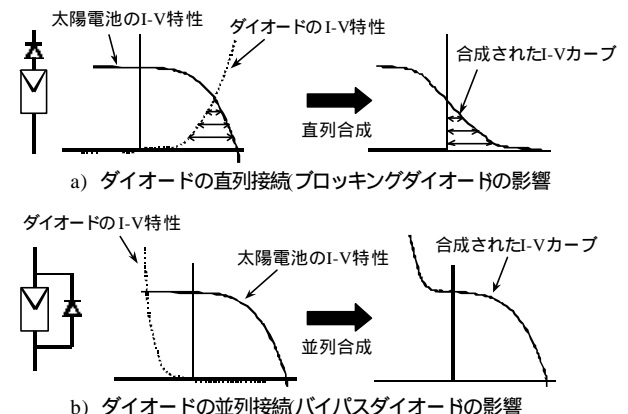


図1. 出力の小さいモジュールに対するダイオードの影響

2. シミュレーション手法の概要

本稿では、電流電圧特性(I-V特性)のシミュレーションを簡易的に行うための「I-Vカーブの重ね合わせ法」の妥当性を評価するために、縮小化モデル実験における測定値と照らし合わせた。縮小化モデル実験の詳細は後述する。ここではシミュレーションの概要について述べる。「I-Vカーブの重ね合わせ法」のフローチャートを図2に示す。

入力パラメータは、モジュールの定格と、日射強度、モジュール温度である。プロットされたI-Vデータを入力することで計算できるが、I-Vデータが無い場合は、パラメータからI-Vカーブを発生させることもできる。また、バイパスダイオード(BPD)やブロッキングダイオード(BLD)として回路内に挿入する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だけなので、比較的正確かつ高速に計算できることが特徴である。

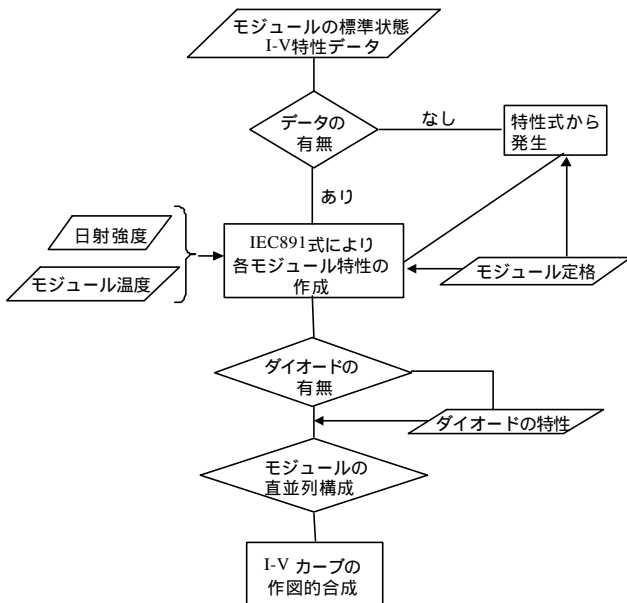


図2. 「I-V カーブの重ね合わせ法」のフローチャート

3. シミュレーションの精度検証

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“単セルモジュール”と呼ぶ)を用いて数多くのパターンの実験を試みた。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3にその実験回路を示す。

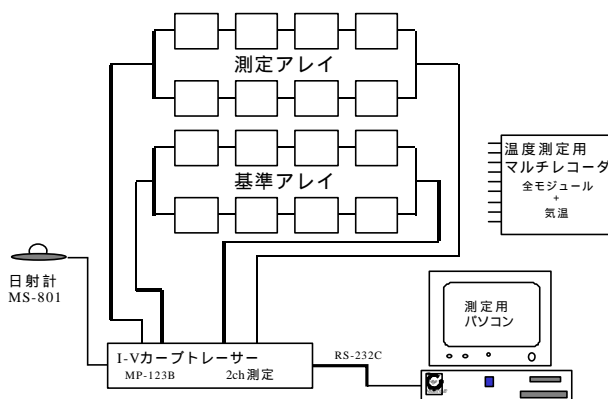


図3. 実験回路

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単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より行っている。さらに、配線の変更や BPD、BLD の挿入も容易にできる構造になっている。

図4に実験装置を示す。写真の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。



図4. 実験装置

図5に測定に用いた、単セルモジュールの写真を示す。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1に単セルモジュールの定格を示す。

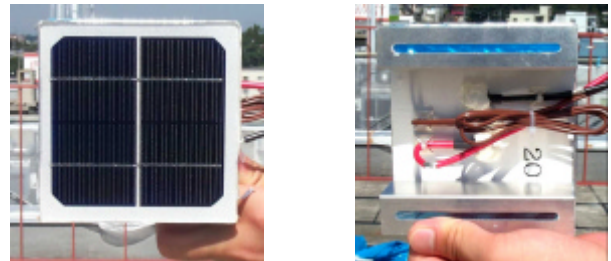


図5. 単セルモジュール

表1. 単セルモジュールの定格

Voc	1.20[V]
Isc	1.95[A]
Pm	1.65[W]
Vpmax	0.95[V]
Ipmax	1.75[A]
Rs	0.08[]
K	0.001[/]
	0.001[A/]
	-0.004[V/]

表2. ショットキーバリアダイオード 3FWJ42N の定格

ピーク順電圧 $V_{FM}(I_{FM}=3.0A)$ 最大	0.37[V]
ピーク繰り返し逆電圧 $I_{RRM}(V_{RRM}=30V)$ 最大	5.0[mA]
接合容量 $C_j (V_R=10V, f=1MHz)$ 標準	140[pF]
ピーク繰り返し逆電圧 V_{RRM}	30[V]
平均順電流 $I_{F(AV)}$	3.0[A]

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。その定格を表 2 に示す。

なお、ショットキーバリアダイオードの場合、通常システムで使われる PN 接合によるシリコンダイオードとは特性が多少異なる。そのため、シリコンダイオード“U15E”を用いた実験も行った。

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“U15E”と、今回実験に用いたショットキーバリアダイオード“3FWJ42N”に関して、接続する太陽電池の枚数を変動させ図 6 に示す実験を行った。結果を図 7 に示す。

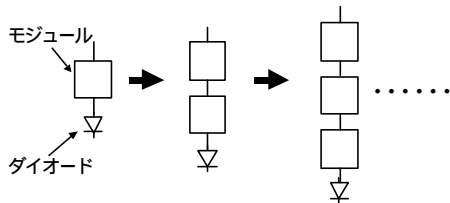


図 6. ダイオードの影響評価実験

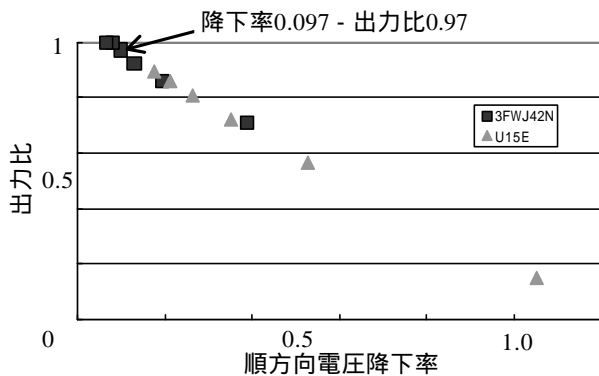


図 7. ブロッキングダイオードの影響

ここで、最大電力量を P_{max} とすると

$$\text{出力比} = \frac{\text{ダイオードが挿入されている場合の } P_{max}}{\text{ダイオードが無い場合の } P_{max}}$$

$$\text{順方向電圧降下率} = \frac{\text{ダイオードの順方向電圧降下}}{\text{ダイオードに接続されたモジュールの定格最大出力}} = \frac{V_{FM}}{\Sigma V_{pmax}}$$

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。実験に使用した単セルモジュールとダイオード“3FWJ42N”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無いと言える。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、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で問題がないことを確認した。

3.2 日陰の出力に及ぼす影響評価実験

太陽電池はアレイの日陰パターンによって、出力が大きく変わる。そこで、本稿では、15 種類の日陰パターンについて測定を行った。また、日陰の影響による出力低下を少しでも抑えるため、通常 BPD、BPD を入れるが、その有無に関しても評価した。

なお、本稿では、アレイ面積に対する日陰面積の割合を日陰率と定義し評価する。また、単セルモジュールを日陰としてカバーで覆い、全影(散乱光の殆ど含まれない影)と見なした。日陰率とアレイ出力比の関係を図 8 に示す。

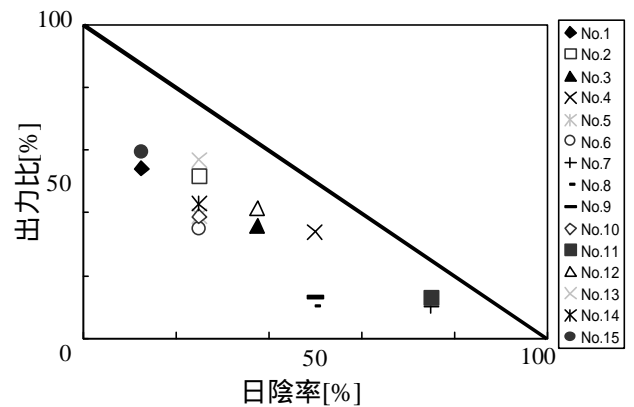


図 8. 日陰とアレイ出力の関係

ここで、

$$\text{出力比} = \frac{\text{各パターンの } P_{max}}{\text{基準とした状態の } P_{max}}$$

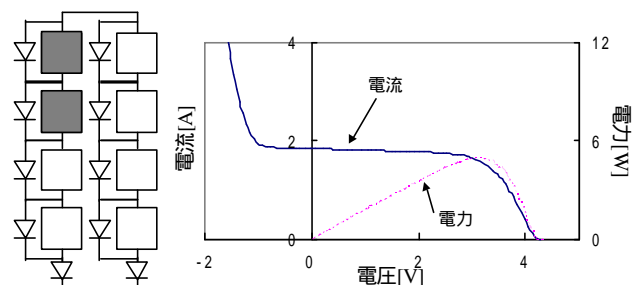


図 9. No. 6 における日陰パターンと電流電圧特性

図 8 において、図中の対角線は、日陰率に比例して出力比が減少する場合に通る仮定の線である。この対角線を大きく下回った場合は、日陰率に対して出力が大幅に減少したことを示している。図 8 における幾つかのデータにおけるの日陰パターン及びその I-V カーブを以下に示す。

図 9 は片方のストリングの一部が日陰となっており、BPD があるにも関わらず、このストリングからの出力が大幅に減るため、日陰率が 25% であるにも関わらず、出

力は 35%しか出ていない。なお、逆電圧領域における電流の立ち上がりは、先に述べた BPD の影響によるものである。また、開放電圧付近における電圧の増加は BLD の影響によるものである。

図 10 は、図 9 と比べて、日陰率は倍の 50% であるが、出力は 34% で殆ど変わっていない。

これらの結果から、直列ストリングの一部のモジュールが直列方向に陰となってしまうことが予測できる場合は、そのような配線はすべきでないと言える。

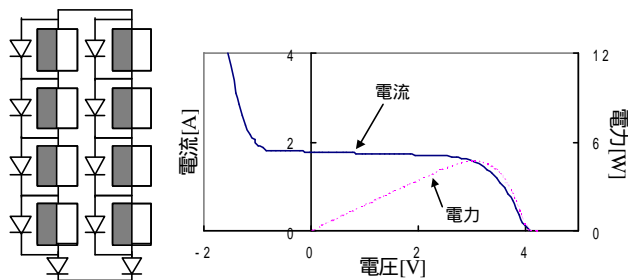
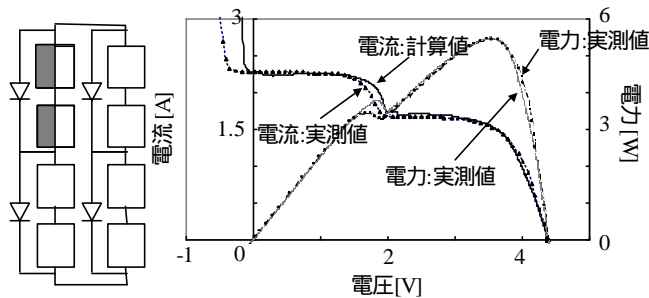


図 10. No. 4 における日陰パターンと電流電圧特性

3.3 シミュレーションの精度検証

図 11 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。



a) 測定回路 b) 実測値とシミュレーションの比較

図 11. シミュレーション結果とその測定回路

測定回路は、単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、影は全影で単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。

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る。理論的な値を算出することができる。

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ q \left(\frac{V + R_s I}{nkT} \right) \right\} - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (1)$$

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。

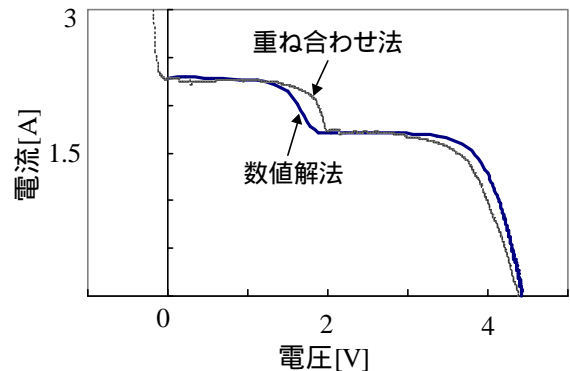


図 12. 「I-V カーブの重ね合わせ法」と「理論式による数値解法」の比較

図 12 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。基となるデータは、図 11 と同様である。若干のずれが見られるものの、大方合っている。よって、「I-V カーブの重ね合わせ法」でも、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ことが確かめられた。

5. まとめ

「I-V カーブの重ね合わせ法」によるシミュレーションでは、陰のかかったシステムであっても比較的精度が高く推定することが確かめられた。また、縮小モデルによって、日陰に対する BPD 及び BLD の効果を検証するために、縮小モデルに利用可能なダイオードの種類を検討した。実験の結果、ダイオードの順方向電圧降下が、ストリングの定格電圧に対して、10% 以下であれば、ダイオードの影響はほぼ無視でき、縮小モデルを用いた実験を行うことが可能である。その縮小モデル実験により、日陰による出力特性への影響が明らかとなった。今後は様々な構成要素をパラメータとして考慮し、大規模システムへと適応させていくことで、システムにおける設計の指針が提案できると思われる。

謝 辞

本研究における実験を行うに当たって、実験装置製作や測定などにおいて、鹿島建設技術研究所のスタッフの方々、及び学部 4 年の石川崇君、登守利征君には大変お世話になった。また、電子技術総合研究所の大谷謙仁研究員からは、全般に渡って多くのご助言を頂いた。これを記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 松川洋・中村洋之・杉浦忠敏・黒川浩助・石川直揮, 太陽電池を複数の方角、および傾斜角に設置した太陽光発電アレイのシミュレーション, (1998) 太陽風力講演論文集