

太陽光パネルにおける陰影に伴う出力変動特性

A study on output fluctuation characteristics due to shading of photovoltaic panel

●
佐藤 宣夫
電気電子情報工学科 教授

水野 健一
電気電子情報工学科 学生

●
2015年9月18日受付

●
Nobuo SATOH
Dept. of Elect. Electron. and Comp. Engineering, Professor

Ken' ichi MIZUNO
Dept. of Elect. Electron. and Comp. Eng.,
Undergraduate student

●
Received : 18 September 2015

Concerns about energy have risen with both global environmental problems and the natural hazards in recent years. In response to these concerns, a solar photovoltaic system that can generate electricity cleanly and safely has been developed. However, even when sunshine is exclusively used, the influence of the environment cannot be discounted, so it is necessary to verify the power output in various environments in which a solar panel has been set up. In this study, the condition in which a part of the solar panel is covered by the shadow of a cloud, tree, and building was assumed. The shadow was intentionally formed on the solar panel using an incandescent lamp instead of sunlight and the variation of the electric-power generation was measured. A circuit simulating the output characteristic was created and the internal state of the photovoltaic panel by the shadow was evaluated. Results indicated that the generated output depended on the minimum value of the photo-electric current in each cell in the module by the proposed circuit for the simulation, including the by-pass diode in the small solar panel.

キーワード：太陽電池，等価回路シミュレーション，再生可能エネルギー

1. 緒言

我が国のエネルギーに関する課題について，地球温暖化への防止策，環境汚染への対処，エネルギー源の確保などの多角的な観点から，議論がなされている⁽¹⁾。そのような中において，再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT; Feed-in Tariff）が問題解決の一助となる可能性がある。このFIT制度において，設備認定済みの容量ベースでは96%以上が太陽光発電システムである⁽²⁾。しかしながら，太陽光発電は，その設置環境に強く依存し，さらに気象条件（特に日照条件）によって大きく発電量が変動してしまうことが課題として挙げられる。また，太陽光発電システムには，機械的な機構部分が存在しないことから「メンテナンスフリー」という甘言を弄して，「設置が完了すれば，一切のケアをする必要なく保証された期間は稼働する」と理解されている部分が少なからずあり，想定内外を問わず，問題が顕在化する可能性がある。実際のシステムでは，性能劣化や意外と高い確率で故障も起きる。さらに，最悪の場合，火災の誘因となることが知られている⁽³⁾。

太陽から地球表面に到達するエネルギーは約 $1\text{kW}/\text{m}^2$ である。太陽の放射エネルギーの1時間分は，全世界が1年分に消費するエネルギー量に相当する量であるとも概算されている⁽⁴⁾。しかしながら，太陽からのエネルギーを

得るためには，まず大きな面積を必要とする。加えて，時間や気象，モジュールの状態などから生じる発電量の不安定さは，火力発電などと比較した場合の太陽光発電のデメリットである。特に，太陽電池パネル上に，雲や木，高所建造物などにより，陰影が生じると発電量が顕著に変化する。今後，有効なエネルギー源として，太陽光発電の更なる利用促進のため（図1参照），これらの問題点を解決する必要がある。

本報告では，太陽電池の出力変化を考量するため，太陽電池パネルの一部を覆うことによる陰影の影響について，実験ならびに模擬回路による定量的評価について述べる。

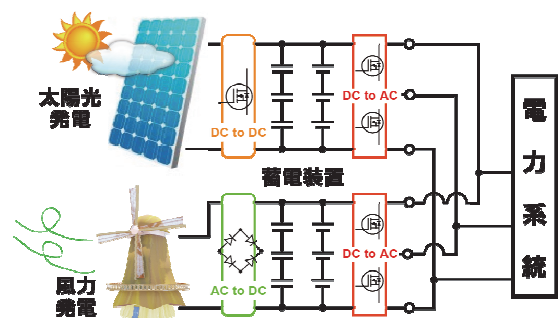


図1 再生可能エネルギーの有効利用例。

2. 太陽電池の基礎特性

太陽電池の発電原理、その動作を理解する際において、太陽電池の構造はpn接合ダイオードが基本となっていることから、太陽電池の内部電界、キャリア生成、その移動などについては半導体工学（電磁気学、熱統計力学、量子力学など）の知識が前提となる⁽⁵⁾。本節では、ダイオード特性、太陽電池の性能指標となる開放電圧、短絡電流、さらに太陽電池の等価回路を理解するために必要となる抵抗成分について述べる。

<2.1> ダイオード特性

ダイオード特性（あるいは整流特性）は、ダイオード素子に対する電圧印加の方向により電流の導通と遮断を生じることになる。導通する向きに、電圧印加した際の電圧-電流特性を順方向特性、その逆の場合を逆方向特性と呼ぶ。また、pn接合ダイオードの電圧-電流特性は以下の式で表される。

$$I_D = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \dots (1)$$

ここで、それぞれ I_D はダイオード電流、 V は出力電圧、 I_0 はダイオードの逆方向飽和電流、 q は素電荷、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。

<2.2> 開放電圧と短絡電流

開放電圧 (V_{oc}) は、太陽電池の負荷を切り離れた状態で、端子間に現れる電圧である。また短絡電流 (I_{sc}) は、負荷を接続せずに短絡させた状態時の電流である。ここで最大電力点 P は、図2に示すような出力特性により描画され、 V_{max} と I_{max} の交点として表示される。さらに太陽電池の性能を表すのに Fill Factor (FF) と呼ばれる指標が用いられており、式 (2) のように示される。

$$F.F. = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \dots (2)$$

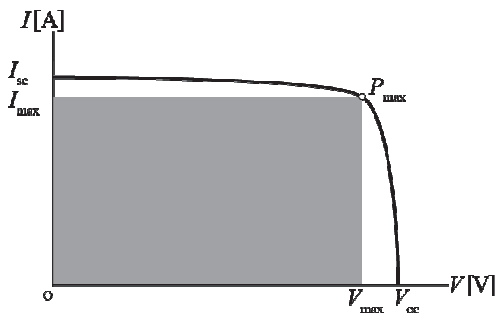


図2 太陽電池の電圧-電流特性

<2.3> 太陽電池の等価回路

太陽電池は、定電流源、並列ダイオード、並列抵抗および直列抵抗からなる等価回路で基礎特性を表現することができる。図3に太陽電池の等価回路例を示す。

また、等価回路の出力電流を算出する式は式 (2.4) となる。

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n_d k_B T}\right) - 1 \right\} - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \dots (3)$$

ここで、それぞれ I は出力電流、 V は出力電圧、 I_{ph} は光電流、 I_0 はダイオードの逆方向飽和電流、 q は素電荷、 R_s は直列抵抗、 R_{sh} は並列抵抗、 n_d はダイオード因子、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。

式 (3) より、出力電流の値は光電効果によって生じた光発生電流から、ダイオードに流れる電流と、並列抵抗へ流れる電流を除いた分であることが理解される。またダイオード特性をとって絶対温度 T を含んで示されていることから、太陽電池の特性およびその測定において、温度の影響があることが分かる。

並列抵抗 (R_{sh}) は、太陽電池の半導体基板中の欠陥やpn接合形成、さらには製造工程で発生する欠陥による漏れ電流に起因する抵抗成分である。並列抵抗は、短絡電流への影響は殆ど無いが、開放電圧に影響を及ぼす成分である。

直列抵抗 (R_s) は、太陽電池の表面側の半導体層や電極など、キャリアの搬送経路上に存在する電気抵抗を含有する成分である。図3に示している等価回路において、その左側はpn接合部を表しており、pn接合以外の部分は等価回路の右寄りの直列抵抗 R_{sh} に含まれている。

3. 実験装置と測定条件

本節では、本報告で用いた太陽電池パネル、ならびに、実験器具についての詳細のほか、測定条件について記述する。

太陽電池パネルは市販（NOATEK社製、最大出力電圧17.3[V]、最大出力電流1.16[A]、図4参照）のものであり、そのサイズは縦56[cm]、横40[cm]である。

また白熱電球（ELPA社製、100[W]、LRS-BTR100B）

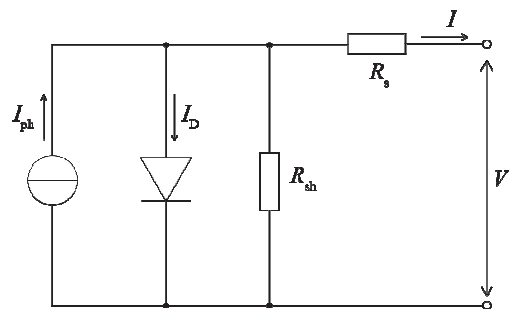


図3 太陽電池の等価回路

を光源として用い、4つをバランス良く配置させた上（図4参照）で、直上照射した。照射量については、ソーラーパワーメーター日射計（佐藤商事社製、LA-1017）により、合わせて測定する。

開放電圧 (V_{oc}) および短絡電流 (I_{sc}) を含む、電圧-電流特性を取得するために、電子負荷装置（TEXIO社製、LW151-151D）を使用して、設定した負荷値毎に測定する。さらに取得された電圧と電流の計測値から電力値を算出した。

太陽電池パネルにおける、1つのセルサイズは8 [cm] × 4 [cm] であり、それが縦9ケ、横4ケが並べてある。ここで意図的な陰（なお、陰影を形成する位置については、本報告では太陽電池パネルの左上のセルを陰影部分とした）を作り、8通りとした陰影（ $a/8$ 陰影となる、ここで a は陰の割合を示し、1～8で変化させる）ならびに陰影が全くない（ $a=0$ 、図4に相当）状態を含め、それぞれの場合における電圧-電流特性を取得し、その発電量を比較した。

また本実験においては、外的要因の影響を強く受けることが懸念されるため、屋内実験環境を整えて実施された。具体的には、太陽や屋内灯からの入射および散乱光によって発電量の変化が生じるため、全ての測定については屋内かつ、暗幕セット内にて測定を行った（図4参照）。

考察を行うために、太陽電池パネルを等価回路によって模擬する必要があり、回路シミュレーション・ツールとしてLTspice IV (Linear Technology社)を用いる。実測データと回路シミュレーションによるデータを比較することで、太陽電池パネル上の陰影が及ぼす出力特性への影響について明らかにする。

4. 実験結果

<4.1> 太陽電池パネル上の放射強度

太陽電池パネル内の各セルへの放射強度を、ソーラーパワーメーター日射計を用いて測定し、平均放射強度は約 $287\text{W}/\text{m}^2$ （最低放射強度 $250\text{W}/\text{m}^2$ 、最高放射強度 $313\text{W}/\text{m}^2$ ）であることを確認した。

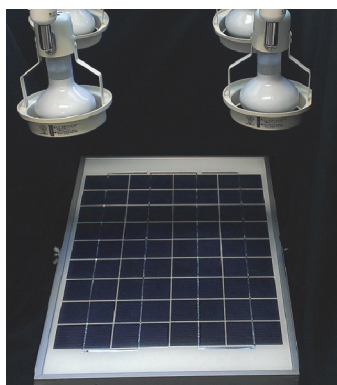


図4 太陽光パネル（多結晶シリコン）と実験環境

<4.2> 光源の輻射熱とその影響

白熱電球光源として、レフランプ（白熱電球の内側にアルミニウムを付着させて反射鏡とすることで、光を効率的に前方に集中させるもの）を使用しており、輻射熱による太陽電池パネルの温度上昇による発電量変化を可能な限り排除するため、その表面の温度を 21°C にて測定を開始した。

<4.3> 電圧-電流特性および電圧-電力特性

図5に、陰無しおよび陰1/8領域～8/8領域における電圧-電流 ($V-I$) 特性を示す。また図6に、陰無しおよび陰1/8領域～8/8領域における電圧-電力 ($V-P$) 特性を示す。

開放電圧 (V_{oc}) について、「陰無し」条件下では 19.79 [V] 、「陰8/8領域」（最大の陰影発生）条件下では 19.51 [V] であり、定量的な差異は 0.28 [V] の低下である。一方、最大電力については、「陰無し」条件下では 2086.0 W 、最低電力は「陰8/8領域」条件下の 436.8 W であり、光照射を受ける面積が22%程度減少する際、実に79%に至る大幅な発電電力の減少が測定された。

5. 考察

本節では、太陽電池パネルの発電電力量が、(1) 受光した面積に略比例しないこと、(2) 陰影なし時の発電電力変動について、考察する。

<5.1> 受光面積と発電量の相関

太陽電池パネルの陰8/8枚分時（受光面積22%減少）

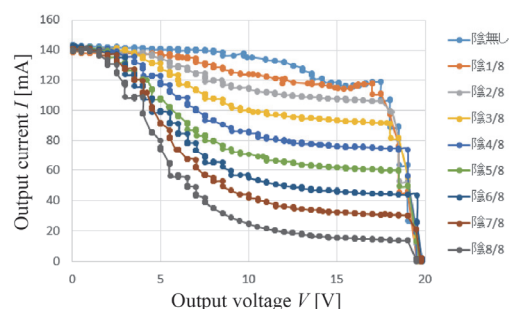


図5 太陽光パネルの電圧-電流特性

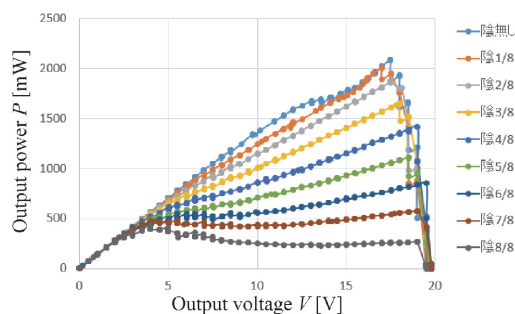


図6 太陽光パネルの電圧-電力特性

における発電電力の低下が79%にまで至っており、受光面積に略比例しないことについて、本節では、太陽電池パネルをセル単位での等価回路を組み合わせるにより、図7に示すような等価回路モデルに基づいて考察する。

ここで、まず太陽電池パネルは、セル単体での等価回路およびバイパスダイオードから形成された模擬回路として示されており、この模擬回路内で使用した各素子の数値パラメータをまとめて表1に示す。さらにLTspice IVにおいて使用したダイオードの各種設定パラメータの項目事項をまとめて表2として示す。

模擬回路において定電流源 I_1 を表1に示した値の範囲において変化させた際の電圧-電流特性を図8に示す。

測定結果では、陰影が掛かった太陽電池パネルには、陰影領域（面積）に応じた電流の減少が観測されていた。今回の模擬回路において、類似の電圧-電流特性を表現する

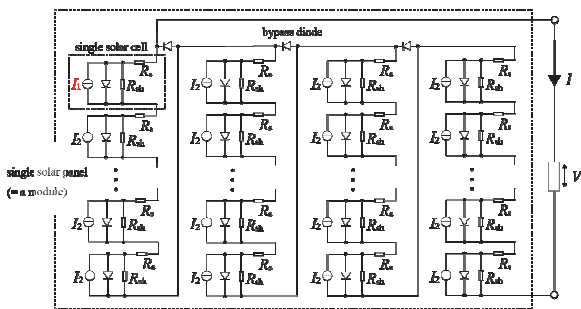


図7 太陽光パネルの等価回路

表1 各素子パラメータ

素子	数値
直列抵抗 R_s [mΩ]	16.7
並列抵抗 R_{sh} [Ω]	870
バイパスダイオード D_b	$I_s=2.52n$ $R_s=.001$ $N=20$ $C_{jo}=4000p$ $M=.1$ $tt=20n$ $I_{ave}=2$ $V_{pk}=70$ $EG=1.1$
ダイオード D	$I_s=2.52n$ $R_s=.001$ $N=1.19$ $C_{jo}=4000p$ $M=.1$ $tt=20n$ $I_{ave}=2$ $V_{pk}=75$ $EG=1.1$
定電流源 I_1 [A]	0.146, 0.118, 0.106, 0.09, 0.07, 0.06, 0.04, 0.03, 0.01
定電流源 I_2 [A]	0.146

表2 設定パラメータ

設定項目	内容
I_s	飽和電流
R_s	内部直列抵抗
N	エミッション係数
C_{jo}	ゼロバイアス接合容量
M	接合傾斜係数
tt	スイッチング時間
I_{ave}	平均整流出力電流
V_{pk}	逆耐圧電圧
EG	活性化電圧 (シリコンの為 1.1V)

ためには、陰影の存在する（と仮定する）セル部分における等価回路内の定電流源の電流値を小さくすることで表現することができることが分かった。これはつまり、太陽電池パネルの発電電力は、複数のセルが配置されている太陽光パネルにおいて、最も光電流の発生が少ないセルに強制的に特性が律速されてしまい、結果として、発電電力量が受光面積に略比例しないと結論される。

また実験結果としては掲載していないが、今回用いた等価回路の妥当性について、例えばバイパスダイオードが無いモデルを用いた場合、具体的には太陽電池セルはすべて直列接続となる。この場合に一部のセルの発生電流の低下の影響は最大電力だけでなく、短絡電流値にも影響することが確認された。これは陰のあるセル（発生電流が最小のセル）の電流値に電流を流す能力が限定されるために短絡電流値にまで影響を及ぼすことが考えられる。

実際、太陽電池パネルにおいては、陰影が生じた場合に太陽電池セルを損傷させる恐れのあるホットスポットの形成を阻止するために、バイパスダイオードが配置されている。バイパスダイオードが有る場合/無い場合の比較検討から、本実験で用いた小型の太陽電池パネルにも、バイパスダイオードが配置されていることが確認された。

<5.2> 電流減少

実験結果である図5における電圧-電流特性について、「陰影無し」および「陰1/8領域」条件においてのみ、測定電圧13~17[V]付近において、特異的な電流値の減少が観測されている。しかしながら、等価回路ではそのような結果は模擬できていない。また実測データについて、「陰2/8領域」条件以降の陰影が増加する際においては、電流減少の傾向が見られないことから、「陰1/8領域」条件として形成した陰部分に相当セルに何らかの異常があったために、正常に光による電子-正孔対が発生/電荷分離ができず、光電流が減少していたと考えられる。

<5.3> 開放電圧値の相違とパネル温度

陰影の発生（本報告では形成）およびその領域の違いに伴って開放電圧 (V_{oc}) に差が生じた点については、残念ながら光源の輻射熱による太陽電池の温度変化の影響を排

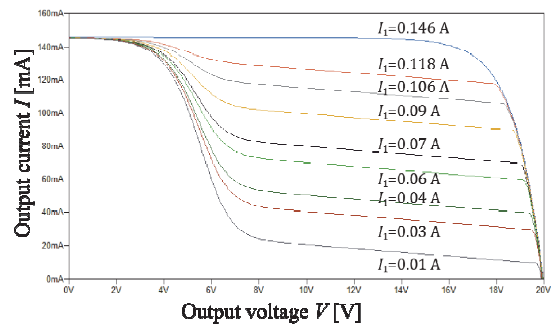


図8 太陽光パネルの等価回路による電圧-電流特性

除できない。太陽電池の基板は半導体であること、また式(1)および式(2)からも、その発電量は温度の影響を受けることが分かり、結晶系では1℃あがることに0.4%程度の発電量が減少することが知られている⁽³⁾。

本実験での太陽電池モジュールの表面温度としては21℃にて測定を開始することとしたが、測定終了時における太陽電池パネルの表面温度は約34.5℃であった。これはある程度の測定時間を要しているためであり、熱平衡状態での測定結果ではなかった。今後、パネル温度の影響の精査については、光照射に伴う輻射熱による熱平衡状態下において再検証によって明らかにしていく。

6. 結言

太陽電池パネルの陰影に伴う出力特性の変動を調査するため、独自の実験環境を整え、陰影面積比率には略比例しない電力量の顕著な減少を実測した。それらが小型太陽電池パネル内のバイパスダイオードを含めた等価回路の提案と解析により、陰影に相当するセルの定電流源の値の変化として電圧-電流特性が正しく模擬された。つまり、太陽電池パネルの一部に陰影などによって発電電力が下がる要因は、直列に接続されている太陽電池の内、光電流がもっとも発生していないセルに律速されていることを明らかにした。以上、本研究の結果から、発電効率が優れた太陽電池が研究、開発されているが、太陽電池パネルを設置する環境を正しく選定しなければ、本来有している性能を最大限に引き出すことはできないことが再確認された。

本報告では、太陽電池の発電原理と発電システムとして性能を正しく理解し、その性能を引き出せようとして運用していく必要性を述べた。産業界においては、太陽電池パネル内の小さな陰影ではなく、太陽電池パネルが複数集まったモジュールにおいて、例えばマイクロコンバータによるMPPT制御(パネル毎の電流量をDC/DCコンバータ回路によって調整する)技術⁽⁶⁾により、大規模な太陽光発電システムにおける陰影の影響の除去についての取り組みがあることを付記する。

今後は、シミュレーションによる電圧-電流特性の精度向上が必要不可欠であろう。太陽光パネルの等価回路とその回路内の素子モデルにおいて、物理現象として正しく模擬するほか、白色光源ではなく太陽光そのもの、あるいは太陽光スペクトルに近い光源を用いた標準試験条件に沿った測定による解析、そして他種類の太陽電池(単結晶Si、多結晶Siのほか、化合物半導体や有機半導体)の出力特性に関する知見を蓄積していく。

以上の成果が結実し、本稿では述べてはいないが蓄電池の利活用⁽⁷⁾を含め、汎用性の高い太陽光発電システムとして確立されることで、我が国に留まらない、地球規模でのエネルギー問題を解決していく一助になる。

謝辞

本研究の一部は、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(文部科学省)および科研費採択者助成金(千葉工業大学)を受けたものである。また本学本学科の平成25年度卒業の明石拓也氏、中村良太氏、平成26年度卒業の高橋智穂氏らの尽力があった旨、謝意を表す。

参考文献

- (1) 石井 彰:「エネルギー論争の盲点」, NHK 出版新書(2011).
- (2) 瀬川 浩司:「太陽光発電が牽引する日本の再生可能エネルギー」表面科学, 35, p.594 (2014) .
- (3) 小澤 淳:「太陽光発電システムのメンテナンス」電気計算, 83, pp.39 (2015).
- (4) 関井 康雄, 脇本 隆之:「エネルギー工学」電気書院(2012).
- (5) 喜多 隆:「太陽電池のエネルギー変換効率」コロナ社(2012).
- (6) 太陽誘電株式会社 URL: <https://www.yuden.co.jp/>
- (7) 佐藤 宣夫, 芦田 有治, 蓑輪 義文, 弦田 幸憲, 西田 保幸, 大森 英樹:「蓄エネシステムとその応用」平成25年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 1-S9-4, pp.43-48 (2013).