

ソーラーセルにおける変換効率の限界

佐藤 憲史*

Limitations of Conversion Efficiencies in Solar Cells

Kenji Sato*

Abstract: Photovoltaic power generation is promising for a renewable energy source. The actual data of generated power and efficiency for the solar power generation system in Numazu College of Technology are depicted. Conversion efficiency of solar cells with Silicon single junction is limited by the quantum efficiency and the built-in potential. The built-in potential increases as the doping level increases, and the conversion efficiency can be improved.

Key Words: Solar cell, conversion efficiency, quantum efficiency, built-in potential.

1. はじめに

太陽光発電は、再生可能なエネルギー源として注目されており、一般家庭にも普及が進んでいる。太陽では核融合による莫大なエネルギーが発生しており、その一部が可視光線となって地球に注ぐ。太陽光から直接電力を発生させるのが太陽光発電であるが、本質的には原子力発電とみなすことができる。太陽光発電の特徴の一つは、一般住宅の屋根に取り付けられるなど、小型化・分散化が可能であることにある。半導体素子が発明された直後に、半導体接合に光照射して発電できることが実証された。太陽光発電の本格的な導入は 21 世紀に入る頃からであり、最近のことである。この背景には、半導体素子とそれを応用したエレクトロニクスが発展があった。現在では、生産される半導体シリコンの用途でソーラーセルの占める割合が 7 割以上までになっている。

しかし、日本における総発電量に占める太陽光発電の割合は 2008 年に 0.2 % といわれており、普及には低コスト化と変換効率の改善が求められている。変換効率とは、ソーラーセルに入射する太陽光エネルギーに対する得られる電気エネルギーの割合である。変換効率の要因分析とその改善については、これまで幾多の検討がなされており、多数の報告がある[1]。本稿では、沼津高専における太陽光発電システムの発電量や変換効率の実態を述べる。次に、シリコン単接合における変換効率について限界を決める要因を概観し、これまで十分には検討されてこなかった要因と課題及び改善案について述べる。

* 電気電子工学科 Department of Electrical and Electronics Engineering

2. 沼津高専の太陽光発電システム

沼津高専では、1999 年、太陽光発電システムが設置されており、約 12 年間の稼働実績がある。身近にあるこのシステムをもとに、発電量や変換効率の実例を示す。表 1 に、システムの概要をまとめる。ソーラーパネルは、校舎の屋上に設置されており、336 枚のモジュールアレイから出力が変電設備へと送電されている。アレイの出力は直流であり、これをインバータにより交流に変換され、商用電源へ接続されている。アレイ上に日射計が設置されており、傾斜日射量をモニタする機能がある。また、インバータに連動して発電量をモニタする機能がある。これらのモニタ値を常時観測できるように、表示装置が取り付けられている。また、日々得られたデータがパソコンに蓄積されている。1999 年から蓄積されたデータをもとに解析を行なった。ただし、発電量のデータに欠落している日が多々見受けられ、パソコンのシステムが古く、データの取り出し等に困難が伴った。

表 1. 沼津高専の太陽光発電システム。

項目	内容
モジュール	多結晶 Si, 最大出力 120 W
面積	モジュール 336 枚, 326 m ²
最大出力	40 kW
設置方向, 角度	南向き, 傾斜角度 20 °
モニタ機能	傾斜日射量, 発電量
電力利用形態	インバータにより商用電源系統へ接続

1 年間を通してほぼ完全なデータが得られている 2001 年の結果を図示する。図 1 は、各月ごとの発電量である。月

によって変動があり, 3 月から 9 月にかけて発電量が多いが, 日射量が多いことを反映している. 月ごとの発電量の平均は 3340 kWh である. また, 年間を通しての発電量は, 合計で 40.1 MWh であった. 沼津高専の電力使用量は, 例えば 2011 年 6 月では 164 MWh となっており, 約 2 % を太陽光発電で賄えることがわかる.

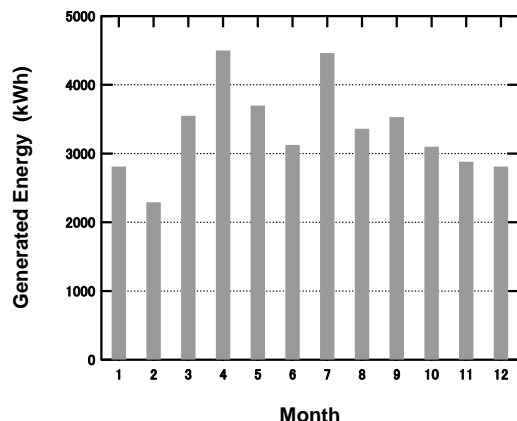


図 1. 沼津高専太陽光発電システムにおける 2001 年の月ごとの発電量. 総発電量は 40.1 MWh である.

次に, 傾斜日射量と発電量から変換効率を見積もった. 変換効率 η_c は, 以下の式より定義される.

$$\eta_c = P_{out}/P_{in} \quad (1)$$

ここで, P_{out} は, 発電により得られた電力であり, P_{in} は入射する光のパワーである. 光パワーは, ソーラーパネルと同一面に設置された傾斜日射計によって計測され, 入射する太陽光パワーを kW/m^2 の単位で取得することができる. そこで, 入射する光パワーをソーラーアレイの面積と傾斜日射量から導出する. 日射量や発電量は, 太陽光の入射角度で変化するが, 1 日の中で正午のデータから変換効率を算出した. 月ごとの平均として表示した結果が, 図 2 である. 2001 年において年間を通した変換効率の平均は 10.1 % であった. 6-9 月の時期に変換効率が低下している. これは, 温度が高くなるとシリコンソーラーセルの特性が劣化することによる. ソーラーモジュールの特性表からモジュールの変換効率は 13 % であるが, システム全体としてはやや劣化した値となっている. この要因として, 夏季の温度上昇による効率低下や, 336 枚のモジュールを接続する配線による損失等が考えられる.

ここで示したデータは 2001 年の結果であるが, 発電量と変換効率の長期的な変動を調査することが重要であり, 今後の課題である. このような調査により, システムに投入されたエネルギーに対する発電により得られたエネル

ギーの収支を明確にする必要がある. また, シリコンソーラーの長期的な信頼性を検証することは, コスト評価という点で重要な課題である.

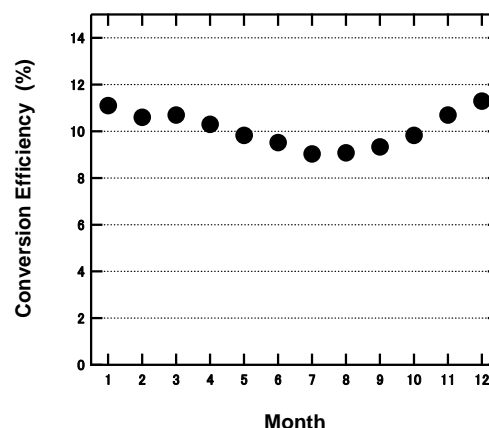


図 2. 沼津高専太陽光発電システムにおける 2001 年の月ごとの変換効率.

3. 変換効率の制限要因

沼津高専に設置された太陽光発電システムの, 使用電力に対する寄与は, 2 % 程度であることが分かった. 太陽光発電の寄与を飛躍的に拡大するためには, ソーラーシステムの規模を拡大することは当然として, 同じ面積, 同じコストで変換効率を高めることが重要であることは論をまたない. ソーラーセルの変換効率の要因分析とその改善については, これまで幾多の検討がなされており, 多数の報告がある[1]. 半導体を用いた単一の pn 接合からなる単接合では, 理論的な変換効率の限界が見積もられており, シリコンでは 29 % といわれている. 市販されている結晶シリコンのモジュールでは 20 % まで達している. 複数の異なる pn 接合を積層した多重接合では波長の異なる太陽光から有効にエネルギーを変換することが可能になり, 40 % 以上の変換効率が実証されている. 多重接合では化合物半導体を用いられており, コストの点で一般に普及することは考えにくい. ここでは, 現在最も普及しているシリコン単接合に限定して, 変換効率の制限要因を簡単に整理し, これまで十分には検討されてこなかった要因について述べる.

ソーラーセルの変換効率は, 大きく 2 つの過程に分けて解析される. 第 1 は, 太陽光が半導体に吸収され電子-ホールペアを発生する過程である. 第 2 は, 発生した電流から電気回路で電力を発生する過程である. 第 1 の過程では, 太陽光のスペクトルに対する半導体の吸収スペクトルが決定要因となる. 図 3 は, 太陽光のスペクトルとシリコンホトダイオード(PD)の量子効率スペクトルを示

す。この太陽光スペクトルは、地表における基準スペクトル(AM1.5)として標準化されているものである[2]。

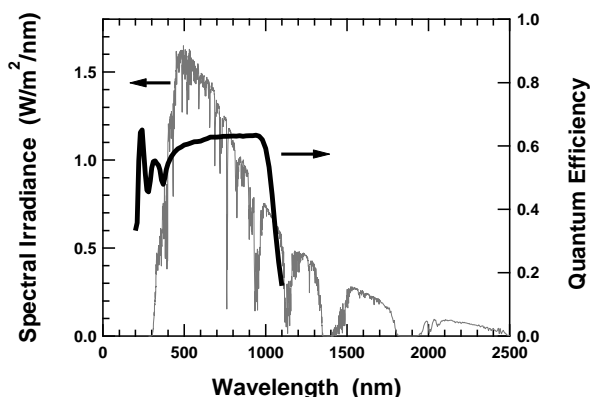


図3. 太陽光の地表におけるスペクトル(AM1.5)とホトダイオードの量子効率の波長依存性。

ソーラーセルは、基本的にはPDと同一の構造、機能を持つ。入射する光子によって電子-ホールペアが発生し、電流が生成される。PDの量子効率 η_D は、以下のように定義される。

$$\eta_D = \frac{h\nu I_{ph}}{qP_{in}} \quad (2)$$

ここで、 h はプランク定数、 ν は光周波数、 I_{ph} は発生する電流、 q は電気素量、 P_{in} は光周波数 ν をもつ入射光のパワーである。 $h\nu$ は光子のエネルギーであり、(2)式は、単位時間あたりに吸収する光子数に対して発生する電流の割合を与える。図3では、シリコンPDの感度スペクトルから見積もった量子効率を示している。シリコンのバンドギャップエネルギーにより、 $1.1 \mu\text{m}$ 以上の波長において量子効率はゼロであり、長波長側の吸収されない光パワーが存在する。この割合(損失)は、太陽光パワー全体に対して23%程度である。このバンド端波長よりも短波側では、量子効率は0.6程度である。量子効率は、変換効率に直接寄与する重要な因子である。量子効率が1以下となる要因は、電子-ホールペア生成に寄与しない光吸収やリーク電流などが考えられる。図3で示したPDの量子効率は0.6であるが、感度を向上させたPDでは、波長にも依存するが0.9が実現されている。ソーラーセルにおける量子効率の評価と理論的な限界については、あまり報告例がなく今後検討すべき課題である。

ソーラーセルの第2の過程では、電気回路により電力を発生させる。ソーラーセルは回路的にはダイオードであり、並列に接続された負荷に発生する電圧と電流の積が電力となる。この電力は、ダイオードの電圧-電流特性(V-I特性)により評価できる。図4に、 $2 \times 5 \text{ cm}^2$ の小型ソーラーセルのV-I特性を測定した例を示す。入射光がない場

合は通常のダイオード特性であるが、白熱電球による入射光がある場合、光量の増大に伴いV-I特性は負の電流方向にシフトする。ここで、特性曲線が第4象限に存在することにより電力が発生する。その電力は、図5に示すような山型の特性となる。ソーラーセルは、入射光が一定であれば電流源のように機能し、ある電圧で最大の電力を得ることができる。図5では、最大電力を与える電圧は0.4V程度である。この電圧よりも高くなると接合の順方向電流が急激に増加し、得られる電力が急激に低下する。電力がゼロ(電流がゼロ)となる電圧は開放電圧と呼ばれているが、図5では入射光強度に依存し0.5-0.6V程度である。最大電力を与える電圧では、外部に取り出せる電子エネルギーは0.4eVである。一方、光子のエネルギー $h\nu$ はシリコンのバンドギャップエネルギー(1.1eV)以上になる。このように、光子のエネルギーに対して得られる電子エネルギーが大幅に縮小することが、変換効率を低下させる最大の要因となっている。シリコン単接合ソーラーでは、 $1.1 \mu\text{m}$ 以上の長波長の太陽光が吸収されないことと、光子エネルギーに対し電子エネルギーが縮小することにより、理論的な変換効率として29%の値が見積もられている[1]。

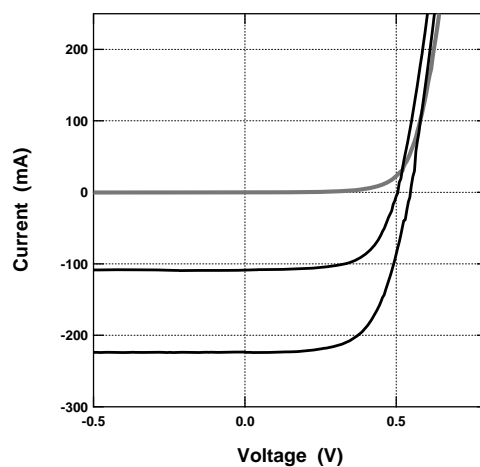


図4. $2 \times 5 \text{ cm}^2$ のソーラーセルの電圧-電流特性。

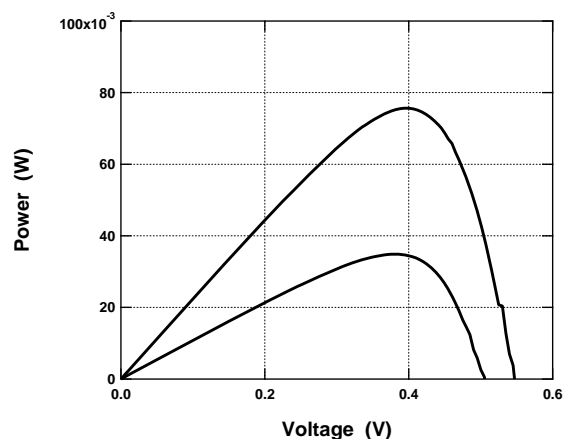


図5. ソーラーセルの電圧-パワー特性。

4. ビルトインポテンシャルと変換効率

ソーラーセルの変換効率は、出力電圧によって律束されており、電圧の増大が可能であれば、変換効率を大きく改善できる。ソーラーセルの出力電圧は、pn 接合におけるビルトインポテンシャルで制限されている。図 6 は、pn 接合のバンド図の概略を示している。ここで、 E_C 、 E_V 、 E_F は、それぞれ、伝導帯エネルギー、価電子帯エネルギー、フェルミエネルギーである。また、 $q\phi_p$ 、 $q\phi_n$ は、伝導帯あるいは価電子帯とフェルミエネルギーの差を表す。pn 接合に現れるエネルギー段差がビルトインポテンシャル V_{bi} であり、このポテンシャルによって電力が発生する。pn 接合の V-I 特性において、接合が導通状態となる電圧がほぼビルトインポテンシャル V_{bi} に相当する。図 4 では約 0.6 V であり、バンドギャップエネルギーから得られる 1.1 V よりも大幅に低下している。

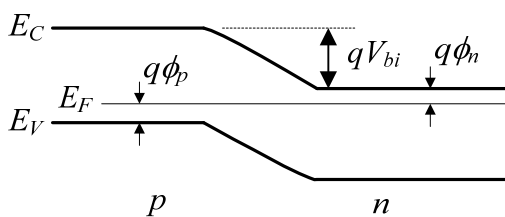


図 6. pn 接合におけるバンド図の概略。

ビルトインポテンシャル V_{bi} は、以下の式で与えられる [3].

$$V_{bi} = \frac{E_C - E_V}{q} - (\phi_p - \phi_n) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (3)$$

ここで、 N_D 、 N_A は、それぞれ、n 層におけるドナー不純物濃度、p 層におけるアクセプタ不純物濃度であり、 n_i は真性半導体のキャリア濃度である。また、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。 N_D と N_A を増大することでフェルミエネルギーがバンド端に近づくため、ビルトインポテンシャルを増大させることができる。図 7 は、シリコン pn 接合のビルトインポテンシャルを計算した結果であり、 $N_D = N_A$ の条件で不純物濃度を変化させている。図 4 の結果では、不純物濃度は 10^{15} cm^{-3} のレベルに相当している。不純物濃度を $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ にすれば、ビルトインポテンシャルは 0.9 V まで増大する。このように、高ドーピングすることでソーラーの出力電圧は 1.5 倍になり、変換効率も同程度の改善が可能である。不純物濃度を高めることによる問題として、オージェ吸収等による量子効率の低下 [1] が指摘されている。また、高ドーピングのための製造工程の複雑化、

高コスト化の問題がある。しかし、あまり検討されておらず、今後取り組むべき課題といえる。

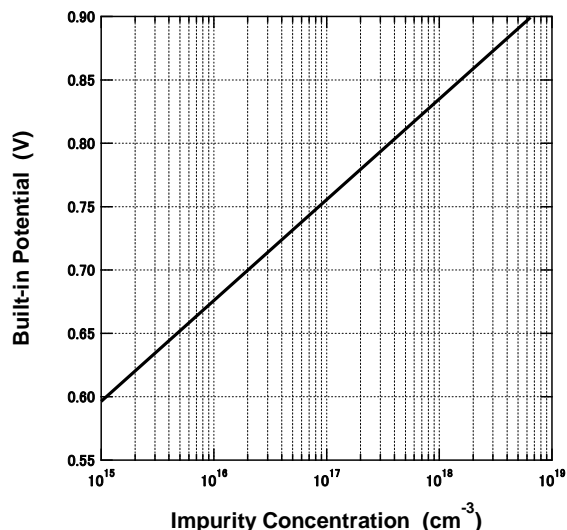


図 7. 計算されたビルトインポテンシャルの不純物濃度依存性。 $T = 300 \text{ K}$ 。

5. おわりに

ソーラーセルの発生電力や変換効率について、沼津高専に設置されたシステムより得られた実測値を示した。変換効率は、シリコン単接合を用いたソーラーセルでは、変換効率の理論限界が 29 % と見積もられているが、その要因を概観した。これまで十分には検討されていない要因として、太陽光に対する量子効率とビルトインポテンシャルの 2 点について指摘した。pn 接合におけるビルトインポテンシャルは、不純物濃度を高めることによって増大させることが可能であり、変換効率を高めるため、今後の課題として重要である。

謝辞

太陽光発電について、卒業研究として取り組んだ本校卒業生の遠藤 秀明君、ジャハン イスラトさん、小林 周平君に感謝する。

参考文献

- [1] 例えば、P. Würfel, "Physics of Solar Cells," 2nd ed., WILEY-VCH, 2009.
- [2] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/>
- [3] S. M. Sze & K. K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices," 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2007.