

# 太陽電池・電気的特性シミュレータの開発

穂高一条<sup>1)</sup>・平井大雅<sup>2)</sup>

A simulation system for electrical specification of photovoltaic cells

Ichijo HODAKA, Taiga HIRAI

Abstract:

Photovoltaic generating systems are considered as one of the effective measures of eliminating CO2 emission, since their energysource are renewable and they neither emit exhaust gases nor CO2 in the course of generation. This study are develops a simulator for photovoltaic generating systems. It is necessary to obtain electrical specification of photovoltaic cells under the sun to make simulator. Since data of the electrical specification are time-varying, automatic operation of measurement is required. This study makes automatic measurement system with microcontrollers. We verify that the data by this system can be consistent with a real data by our simulator.

Key words: photovoltaic(PV) cells, automatic operation, microcontrollers, simulator

## 1. はじめに

太陽光発電システムは、発電に際しての二酸化炭素や排気ガスの発生もなく、地球エネルギー起源のCO<sub>2</sub>抑制策の一つとして期待されている。

そこで、太陽電池に着目し、シミュレータの開発をする。シミュレータを作るには太陽光のもとでの太陽電池セルの電気的特性を得ることが必要である。この特性のデータは各時刻ごとに変化するのでその特性を自動で測定する必要がある。

この研究ではその自動測定システムをマイコンを使って作る。このシステムで得られたデータは、シミュレータによりうまく再現されることを確認する。

## 2. 太陽電池の特性

太陽電池の特性は、種類や光エネルギーなどにより変動するので、数値的取り扱いが複雑になる。出力特性はI-Vカーブから算出する事が出来るためI-V特性と呼ばれ重要なパラメータである。

図1の太陽電池の等価回路を示す。太陽光に比例する大きさ  $I_{ph}$  を電流源とすれば、理想的には出力電流  $I$  と等しくなる。

しかし、太陽電池は p-n 接合を持つダイオード素子であるために内部損失が生じる。動作電圧  $V_j$  に応じて発生するダイオード電流  $i_d$  は太陽電池の種類で決ま

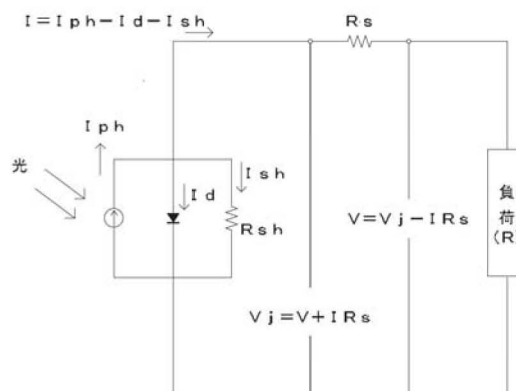


図 1: 太陽電池の等価回路

る逆方向飽和電流  $I_o$  とダイオード因子  $N$  から式(1)のように表される。

$$I_d = I_o \left( \exp \frac{qV_j}{NKT} - 1 \right) \quad (1)$$

但し  $K$  はボルツマン定数 ( $= 1.38 \times 10^{-23}$  [J]),  $T$  は絶対温度,  $q$  は素電荷 ( $= 1.602 \times 10^{-19}$  [C]) とする。

また、p-n 接合界面の不整合などにより表面を流れる漏れ電流  $I_{sh}$  は、動作電圧  $V_j$  に比例して生じるため、並列抵抗  $R_{sh}$  を用いて式(2)で表される。

$$I_{sh} = \frac{V_j}{R_{sh}} \quad (2)$$

出力電流  $I$  は、

\*\*電気電子工学科准教授  
\*\*電気電子工科学部生

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3)$$

$I$ : 負荷に流れる電流,  $I_{ph}$ : 発光性電流,  $I_d$ : p-n 接合の順方向電流,  $I_{sh}$ : 接合の漏れ電流となる。

動作電圧  $V_j$  は p-n 接合部の接合電圧に相当し, 並列抵抗  $R_s$  とすれば, 出力電圧  $V$  は

$$I = V_j - IR_s \quad (4)$$

となる。この関係を用いて式(1)及び式(2)から  $V_j$  を消去して, 式(3)に代入すれば, 出力電流  $I$  は次式となる。

$$I = I_{ph} - I_o \left( \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{NKT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

(5) 式が太陽電池の特性を表す一般式である。(5) 式から I-V 特性を求める場合, この式は超越方式といって, 代数的に計算しにくいいため, 今回は mathematica で計算を行う。

### 3. 太陽電池・電氣的シミュレータ

太陽電池パネル4枚を直列にすると太陽光から最大約 6 [V] の電圧が検出された。太陽電池パネルが太陽光と同じ電圧を検出するために, 最大約 6V の電圧が検出するように考えた。

まず, 懐中電灯用のライト 4つ約 3.2 [V] の電圧を検出した。次に, 低い電圧も得られるようにマイコンと FET を用いて光の調節ができる白色発行ダイオード (LP-5W170) を用いた。動作電圧  $V_f=3.2-3.4$  [V], 定格電流  $I_f=20$  [mA], 輝度 17000 - 20000 [mcd] の高輝度白色発光ダイオードである。約 2.0 [V] の電圧が検出された。そこで懐中電灯用のライト 4つと発行ダイオードを組み合わせた。しかし, 太陽電池パネルから得られる電圧は約 3.8 [V], 発光ダイオードでは十分な電圧を得られることができなかった。

今度は 12V 専用ライト (12 [V]35 [W]) を設置した。このライトは 4つで最大 6 [V] まで検出でき, 1つはライトの首が動かせるので電圧調整が出来る。この1つのライトは小さい電圧も検出できるように 12 [V] 専用ライト (12 [V]23 [W]) を使用した。

	電圧 [V]	距離 [mm]
懐中電灯 (4つ)	3.19	300
白色 LED (6個×7列)	1.96	200
懐中電灯+白色 LED	3.77	—
12V 専用ライト (4つ)	6.05	300

回路は, リレーと FET を組み合わせた回路にした。FET は, マイコンでスイッチの切り替えを行うために用いる。マイコンの定格が 5 V なので 5V 電源装置をセットする。リレーは 6 [V] ~ 作動するので 9 [V] 電源装置をつける。回路図は図2である。

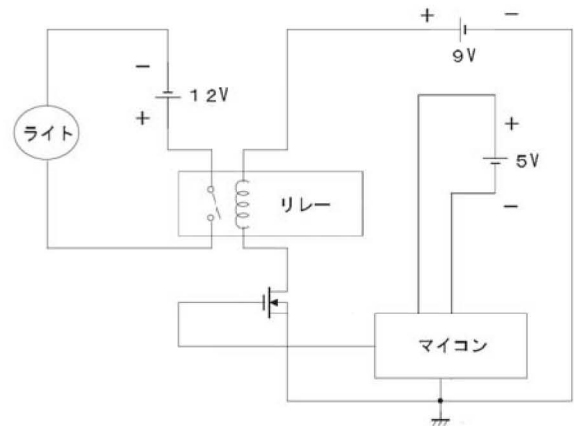


図 2: シミュレータの電気回路図

大きさは, 縦 450 [mm] × 横 600 [mm] × 高さ 300 [mm] のシミュレータの中で測定を行う。シミュレータの寸法は, 太陽電池パネルが数枚置けるように, 縦, 横, 高さを大きめに作成する。

しかし, 高さの寸法は高すぎるとライトからの光が届かないので, 事前に太陽電池パネルとライトの距離 (電圧を多く取る位置) を確認しておく。ライトと太陽電池パネルの距離 80 [mm] 付近で最大電圧 1.5 [V] を得る。

そして, 80 [mm] ~ 250 [mm] ならば太陽電池 1.5 [V] ~ 1.2 [V] の電圧を得る。この間にライトを設置することにより, 太陽電池パネルの最大電圧に近い電圧を得ることができると考えた。よってライトの高さを 200 [mm] に設置した。

さらに電源スイッチの他にリレーやトグルスイッチを付け, 電圧調整を可能にした。

図3 はシミュレータの内側の写真である。

微妙な電圧調整はライトの首が動くようになっている。よって電圧調整が便利で簡単である。ライト 4つで約 6 [V] 太陽電池パネルから電圧を得られる。ライト 4つで約 6.05 [V], ライト 3つで約 5.90 [V], ライト 2つで約 5.46 [V], 真上の首振りライトで 3.6 [V] ~

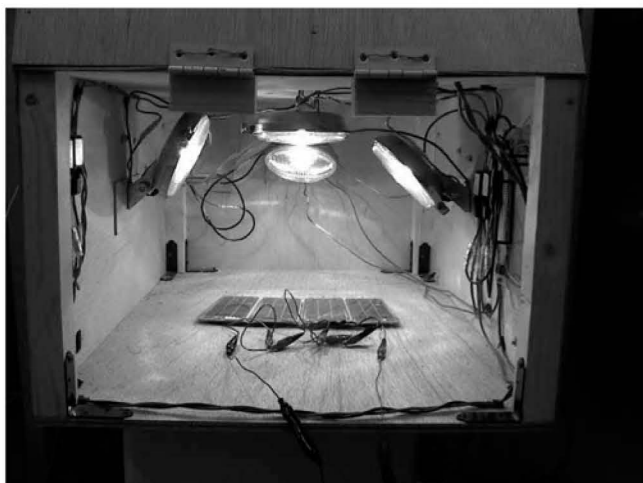


図 3: シミュレータ内側

5.1 [V]になる。これは実際の太陽電池パネルが太陽光から得られる電圧として、晴れ，曇り，日の出・日入りと十分な電圧となる。

	晴れ [V]	曇り [V]	日の出 [V]
太陽	6~5.4	5.3~4.8	4.7~0
ライト 4つ	6.05	-	-
ライト 3つ	5.90	-	-
ライト 2つ	5.46	-	-
首振りライトのみ	-	5.1~3.6	3.6~0

#### 4. マイコン

マイクロコンピュータ (Microcomputer) は、「超小型のコンピュータ」(小型で制御専用はマイクロコントローラ) という意味、以下複数の意味合いで用いられる。これが略称マイコンと呼ばれている。

コンピュータの中核部(最低限 CPU 部分)をひとつの大規模集積回路 (LSI) に集積したもの。用途により入出力などの周辺回路や、メモリを内蔵するものもある。今回実験で使うのは QB-V850ESKG2-TB である。

QB-V850ESKG2-TB とは NEC エレクトロニクス社製のプログラミング機能付きオンチップデバッグエミュレータ MINICUBE2 を使用して、マイコンを動作させるためのターゲットボードである。

V850ES/KG2 ターゲットボード (QB-V850ESKG2-TB) の特徴として

- V850ES/KG2(  $\mu$  PD70F3732GC) 搭載

- システムクロック 20 [MHz](5 [MHz] 発振子を搭載) で高速動作可能
- フラッシュメモリ :256 [KB], RAM:16 [KB] を内蔵
- 最大で 84 本の I/O ポートを装備
- プログラミング, オンチップデバッグ (SI00, SO00, SCK00, PCM0 端子使用) に両対応
- LED2 個, SW1 個を搭載しており簡単なテストが可能
- ユニバーサルエリア (2.54 [mm] ピッチ) を搭載
- マイコンの端子を周辺ボードコネクタに配置した高拡張性
- 鉛 (PB) フリー対応品
- 動作電圧 2.7 [V]~5.5 [V], 電池 2 本で動作可能などがある。マイコンを使うには Applilet の設定が必要である。NECweb サイトから Applilet の設定とダウンロードを行う。

#### 5. FET と負荷を用いた回路

AD0 には  $R_A$  と  $R_B$  での分圧で半分の値が出るように  $R_A=R_B=200 [k \Omega]$  を挿入する。太陽電池の電流を消費させないために、 $R_A=R_B$  を大きい抵抗にした。

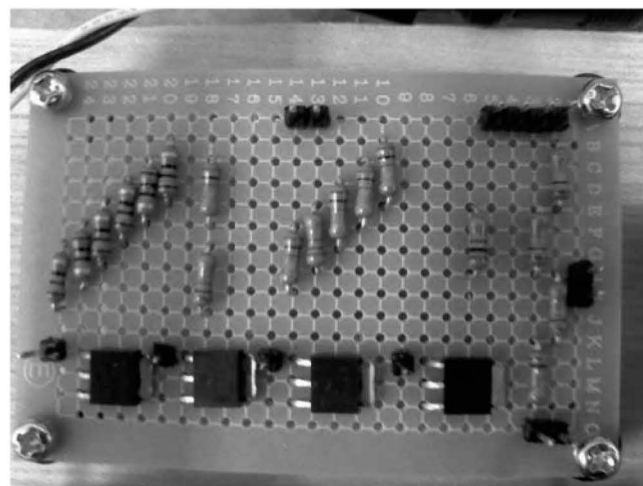


図 4: 分圧回路と 4 つの FET と負荷回路写真

マイコンは 5 [V] までしか測定できないのでこれは太陽電池パネルから測定される電圧が最大 6 [V] なので P00~P11 には FET を用いることによりプログラム制御が可能となり ON/OFF の起動が働く。1 つの分圧回路と 4 つの FET と負荷の回路を取り付ける。

	P00	P10	P01	P11	抵抗 R[Ω]
0000	OFF	OFF	OFF	OFF	∞
0001	OFF	OFF	OFF	ON	200
0010	OFF	OFF	ON	OFF	500
0011	OFF	OFF	ON	ON	142.86
0100	OFF	ON	OFF	OFF	60
0101	OFF	ON	OFF	ON	46.15
0110	OFF	ON	ON	OFF	53.57
0111	OFF	ON	ON	ON	42.25
1000	ON	OFF	OFF	OFF	1000
1001	ON	OFF	OFF	ON	166.67
1010	ON	OFF	ON	OFF	333.33
1011	ON	OFF	ON	ON	125
1100	ON	ON	OFF	OFF	56.60
1101	ON	ON	OFF	ON	44.11
1110	ON	ON	ON	OFF	50.85
1111	ON	ON	ON	ON	40.54

今回は R00~R11 には R00=1 [k Ω], R10=60 [Ω], R01=500 [Ω], R11=200 [Ω] の抵抗を挿入することにより 16 通りの電圧と電流を測ることができる。16 通りのサンプルを測定できることにより 電圧-電流の特性が広範囲に測定できる。今回は太陽電池パネルから得られる電圧と電流が小さいため、電圧-電流特性がより分かるように以下の表のような抵抗にした。

分圧回路と 4 つの FET と負荷の回路を 1 つにまとめた図 4 の写真図である。図 5 に太陽電池からの分圧回路と FET・負荷をマイコンに接続し、電圧・電流を測定するための回路図を示す。

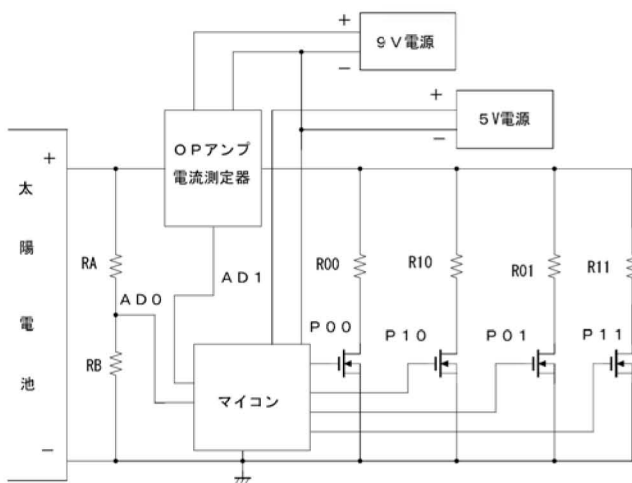


図 5: 太陽電池の電圧・電流測定回路図

6. 電流測定器 OP アンプ

今回の太陽電池は最大 6 [V] まで電圧を取ることができ、マイコンは 5 [V] までしか測れないので AD0 には太陽電池からの電圧 1/2 の値を取る。RS232C シリアル通信を使うので最大 5 [V] の 10 [Bit] より、5 [V]=1023 とする。PC 上には X の数値が出るので

$$V = \frac{X}{1023} * 5 * 2[V] \tag{6}$$

で電圧が求まる。しかし、電流は測定することができない。マイコンには電流を測る足がなく、電圧しか計ることができないのである。

単純に小さい抵抗を出力に対して直列に接続し、その両端の電圧を測定することで回路に流れる電流を測定することができるが、マイコンの A/D コンバータは最大 5 [V] の 10 [Bit] であり、最小 4.88 [mA] の変動まで測定できる。A/D コンバータの誤差も考慮すると、わずかに流れる電流の値を正確に測定できないのである。

そこでバッテリー駆動システム用双方向電流センサを参考にして電流測定器 OP アンプを作成する。

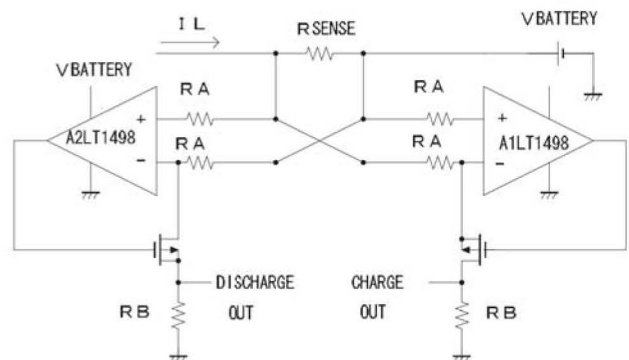


図 6: 電流測定器 OP アンプ回路図

電流測定器 OP アンプには 2 つの出力があり、1 つは充電電流に比例し、もう 1 つは放電電流に比例する。この回路は LT1498 のレール・トゥ・レール入力範囲と位相反転保護を活用している。充電サイクル中、OP アンプ A1 は RA の電圧を (IL) (RSENSE) に強制する。

この電圧は RB / RA の比によって CHARGE OUT で増幅される。

よって RSENSE に流れる電流 IL と出力 Vo の関係式は

$$V_o = I_L \left( \frac{R_B}{R_A} \right) * R_{SENSE} \tag{7}$$

である。

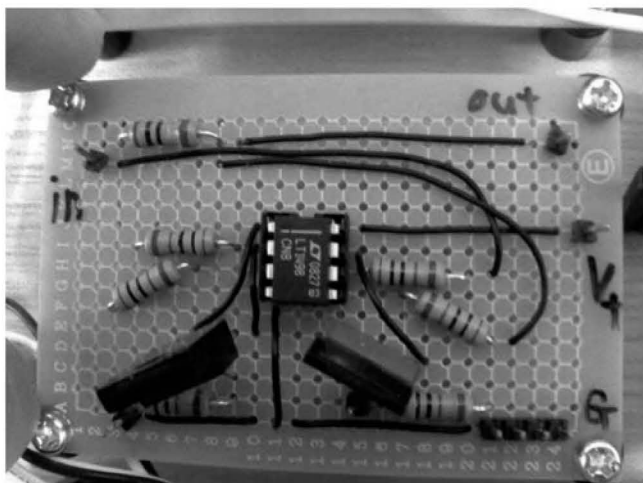


図 7: 電流測定器OP アンプ回路写真

図6 のように  $R_{SENSE}=1 [\Omega]$ ,  $R_A=1 [k \Omega]$ ,  $R_B=20 [k \Omega]$  を接続すると

$$I_L = V_o \left( \frac{R_A}{R_B} \right) * R_{SENSE} = V_o \left( \frac{1}{20} \right) = V_o / 20 [A] \quad (8)$$

となる。これは A/D コンバータの機能と太陽光電池の電圧変動を比較して十分である。

### 7. 1 日の太陽電池・電気的特性の結果

実際の太陽光で電圧・電流の測定を自動で行う。3分間に負荷の違う 16 通りの電圧と電流測定を自動で行う。

- 日にち: 2009 年 2 月 7 日
- 場所: E 棟 8 階屋上
- 天候: 晴れ
- 最高気温: 18.9 [°C]
- 最低気温: 4.7 [°C]
- 測定時間: 6~19 [時]

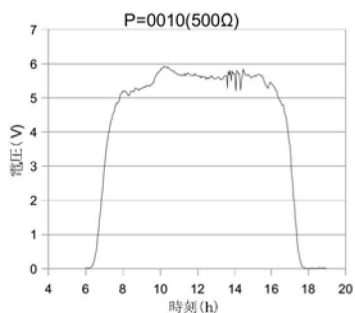


図 8: 自動でデータ測定の結果・電圧

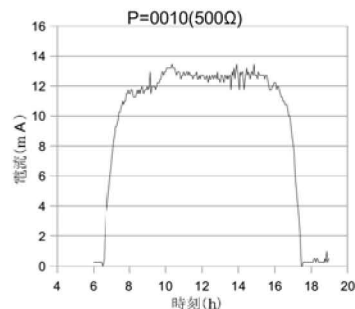


図 9: 自動でデータ測定の結果・電流

### 8. シミュレート

1 日の太陽電池・電気的特性と太陽電池の電圧-電流特性をシミュレートした。グラフよりシミュレート結果は調整不足のため、値が違うが能力的には同等の電圧-電流特性を出せることが確認できた。縦軸が電流 (mA), 横軸が電圧 (V) を表す。

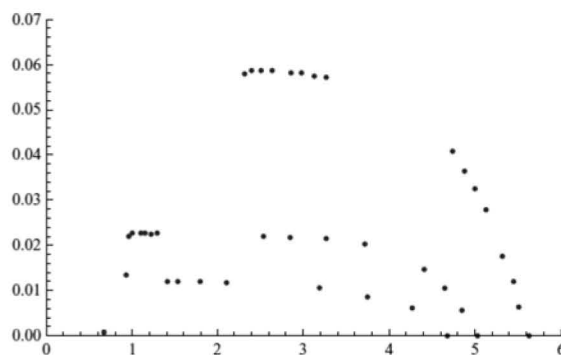


図 10: 自動でデータ測定結果の I-V 曲線

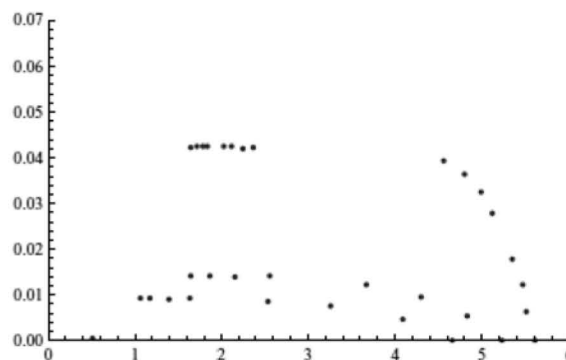


図 11: シミュレータの I-V 曲線

### 9. おわりに

本研究で開発した装置は、1日の太陽電池・電気的特性を自動でデータ測定を行い、太陽電池の電圧-電流特性を時間短縮して、室内でもシミュレートできることが確認できた。

\*参考文献

- [1] 太陽電池とその応用「エレクトロニクス製品から電力応用発電まで」パワー社 工学博士 桑野幸徳 著
- [2] 太陽電池(Solar Cell)「原理・製法から応用システムまで」パワー社 辻高輝 著
- [3] 太陽光発電 森北出版(1980) 高橋清, 浜川圭弘, 後川昭雄 著
- [4] 新C言語入門(ビギナー編・シニア編) SoftBank Creative 林晴比古 著
- [5] m p l a b C 1 8 ( C 1 8 コンパイラによる P I C 1 8 マイコンの応用) (株) マイクロアプリケーションラボラトリー 小川晃 著
- [6] CによるPIC活用ブック 東京電機大学出版局 高田直人 著