

# 抵抗負荷による太陽電池 I-V カーブ測定 における掃引方向について

穂高 一条<sup>1</sup>・兵頭 猛<sup>2</sup>

## On Sweep Direction in Photovoltaic Cell I-V Curve Measurement by Resistive Load

Ichijo HODAHA, Takeshi HYODO

### Abstract

The current-voltage characteristics of solar cells are generally influenced by the voltage sweep direction and sweep time during the measurement. This study, I investigates the effect of the sweep direction on the I-V characteristics of polysilicon. The I-V curve is measured by resistive loads. The value of resistance is changed and the data of 64 points are taken. The data of two kinds of sweep directions are taken. Directions from the open circuit voltage to the short circuit current and a measurement from the short circuit current to the open circuit voltage are performed.

Key Words:

sweep direction, polysilicon, resistance load

### 1 はじめに

太陽電池の電流電圧特性(以降 I-V 特性と呼ぶ)はその種類により、掃引方向や掃引時間に影響を受けることが知られている。秒単位以上と桁違いに応答が遅い色素増感型太陽電池は別格としても、現在量産されている結晶 Si 太陽電池においても、アモルファスシリコンと結晶シリコンから構成されるヘテロ接合型太陽電池では I-V 特性の掃引時間が 0.1 秒以内の場合には、掃引方向により最大出力に明らかな差があることが知られている。しかし、これらの効果に対する詳細な検討は十分なされていないのが現状である。そこで、本実験では掃引方向に着目し太陽電池の I-V カーブ特性を測定することで太陽電池の電気的特性を調べ、I-V カーブ特性測定の掃引方向の違いが与える影響について検討することを目的とした。本研究では縦 279[mm]、横 433[mm]の多結晶シリコン太陽電池パネルを 2 枚つなげたものを使用している。この太陽電池の最大電力は 26[W](1 枚あたり 13[W])である。この太陽電池を FET と抵抗の回路に接続し、マイコンで制御することで電圧、電流の測定を行う。

### 2 I-V カーブ測定

#### 2.1 回路

抵抗、FET を用いた回路を作成する。マイコンは 5[V] までしか測定する事が出来ないため、太陽光パネルからの電圧を分圧する必要がある。そこで、前もって太陽光パネルのみで電圧・電流を測定し、その結果最大電圧 20[V]、最大電流 2[A] であったため今回は 1/11 に分圧するように設計した(分圧するのに使用した抵抗は 680[KΩ]、68[KΩ])。FET に接続する抵抗は 1.2[KΩ]、670[Ω]、250[Ω]、100[Ω]、70[Ω]、25[Ω] の 6 個である。回路図を図 2.1 に示す。

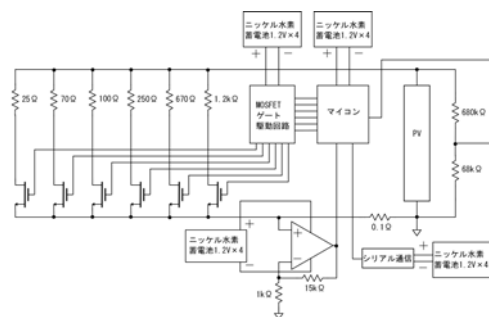


図 2.1: 回路図

この回路は FET を制御することで抵抗値を 64 通りに変化させる。64 通りの抵抗値は表 1 に示す。表 1 は、000000 ~ 111111 までの各々の合成抵抗を表して

<sup>1</sup>電気電子工学科准教授

<sup>2</sup>電気電子工学科学部生

いる。

表 1: 抵抗値

ON,OFF	抵抗値	ON,OFF	抵抗値
000000		100000	25.00
000001	1200.00	100001	24.49
000010	670.00	100010	24.10
000011	429.95	100011	23.63
000100	250.00	100100	23.43
000101	206.90	100101	22.30
000110	182.07	100110	21.98
000111	158.08	100111	21.59
001000	100.00	101000	20.00
001001	92.31	101001	19.67
001010	87.01	101010	19.42
001011	81.13	101011	19.11
001100	71.43	101100	18.52
001101	67.42	101101	18.24
001110	64.55	101110	18.02
001111	61.25	101111	17.75
010000	70.00	110000	8.42
010001	66.14	110001	8.14
010010	63.38	110010	7.93
010011	60.20	110011	7.66
010100	54.69	110100	7.16
010101	52.30	110101	6.92
010110	50.56	110110	6.73
010111	48.52	110111	6.50
011000	41.18	111000	7.12
011001	39.81	111001	6.92
011010	38.79	111010	6.73
011011	37.58	111011	6.50
011100	35.35	111100	6.06
011101	34.34	111101	5.84
011110	33.58	111110	5.68
011111	32.67	111111	5.48

### 2.2 FET

マイコンを用いて FET のゲート-ソース間電圧を 5[V],0[V] にすることで FET の ON,OFF を制御する。使用する FET は TOSHIBA 製の電界効果トランジスタ, シリコン N チャネル MOS 形 ( $\pi$ -MOSV)2SK2382 である。この FET の特徴としてオン抵抗が低い (標準で 0.13[  $\Omega$  ]), 漏れ電流が低い (ドレイン-ソース間電圧 200[V] において最大で 100[  $\mu$  A]) などが挙げられる。本研究において, まずは FET と抵抗の数を 4 個から始めた。FET と抵抗が 4 個の場合, 得られるデータが 16 点しかないため各点の間隔が広く正確な I-V カーブが得られないことがあった。そこで, FET と抵抗の数を 5 個に増やし同様の実験を行った。得られるデータは 32 点となり, 以前よりは I-V カーブが正確になったがまだ完全ではなかった。これにより再度 FET と抵抗を増やす必要があり, 最終的に FET と抵抗の数は 6 個で実験を行った。

### 2.3 OP アンプ回路

マイコンでは電圧は測定できるが電流は測定できない。そこで, 小さい抵抗を出力に対して直列に接続し, 抵抗の両端の電圧を測定することで電流値をオームの法則より導き出す。その時に, 読み込む値が小さすぎる場合正確な値が得られないため, OP アンプを用いて電圧を増幅させる。本実験では National Semiconductor Corporation 製の LM324 を使用する。前もって太陽光

パネルのみで電圧・電流を測定し, OP アンプの倍率を 16 倍に設定した。そのために LM324 に 15[K  $\Omega$  ], 1[K  $\Omega$  ] の抵抗を接続した。回路図を図 2.4 に示す。図 2.4 に示すように, 入力端子から電流が入力され LM324 によって電流が 16 倍に増幅された後に出力端子から出力される。

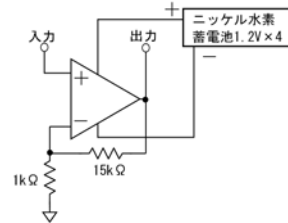


図 2.2: LM324 の回路図

### 2.4 測定データの処理

採取された実験データは SD カードに記録するように設定する。そのために, SD カード記録用の基板を入手しマイコンのシリアル通信でデータを送信して保存する。その時使用するのが株式会社アルファプロジェクト製の PC-SDRW-01 である。シリアル I/F ケーブルを用いて接続し, マイコンのシリアルポートからのデータを SD カードに保存する。

この時に得られるデータは電圧の値そのものではない。例えば, 電圧値が 5[V] のときは PC 上では 1023 と表示される。つまり PC 上に表示される値を X とすると

$$V = \frac{X}{1023} \times 5 \times 11 \tag{2.1}$$

という式で電圧が求められる。測定した値は分圧されているので 11 倍することで元に戻している。

電流についても同様である。PC 上に表示される値を Y とすると

$$V = \frac{Y}{1023 \times 16} \times 5 \tag{2.2}$$

という式で電圧が求められる。OP アンプで増幅しているので 1/16 をかけることで元に戻している。抵抗の値が 0.1[  $\Omega$  ] なのでオームの法則より電流は

$$V = I \times 0.1 \tag{2.3}$$

$$I = V \times 10 \tag{2.4}$$

式 (2.2) を代入して

$$I = \frac{Y \times 5 \times 10}{1023 \times 16} \tag{2.5}$$

となる。以上の計算結果を用いて電流、電圧の値を求める。

## 2.5 MOSFET ゲート駆動回路

FET を 6 個つまりマイコン出力端子を 6 個同時に使用した場合、マイコンでの制御が正常に行われないことが実験において確認された。FET の数を減らし、使用するマイコンの出力端子を減らしていくことで問題は徐々に減少していった。これは、マイコンで FET を制御するための電流が不足していることが原因であると考えられる。そこで TOSHIBA 製の MOSFET ゲート駆動回路 TC4049BP を用いることでこの問題を改善した。TC4049BP は反転型の集積回路であり最大 6 回反転可能である。今回は反転を 2 回行うものを 1 組とし、全部で 6 組を使用した。1 組分の回路図を図 2.6 に示す。

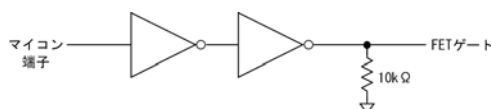


図 2.3: MOSFET ゲート駆動回路

## 2.6 測定用プログラム

I-V カーブ測定を行うためのプログラムを作成する。このプログラムは配列を利用し、64 点の測定が出来るようにしている。A/D コンバータを用いて電圧・電流の測定を行い、そのデータを 64 点の測定を行う度に SD カードに保存する。また、64 点の測定を行った後、毎回 2 行の空白を空けるようにしている。これは、実験後にグラフの時間変化をアニメーションにする時に空白が必要なために行っていることである。

## 3 掃引方向の違いが I-V カーブ特性に与える影響

### 3.1 掃引方向

太陽電池の I-V カーブ測定において、掃引方向が電流、電圧に及ぼす影響について検討した。掃引方向として、短絡状態 (short circuit) から開放状態 (open circuit) 方向への掃引 ( $I_{sc}$   $V_{oc}$ )、開放状態から短絡状態方向への掃引 ( $V_{oc}$   $I_{sc}$ ) の両方向の測定を行った。使用したプログラムを付録に示す。

このプログラムは始めに  $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向への測定を行い、次に  $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向への測定を行うものである。1 回の測定にかかる時間は 5 秒に設定した。このようにすることで、日射量、温度変化による I-V カーブの

変化を小さくすることができる。もし 2 種類の方向の測定を別の時刻に実施すると日射量、温度変化による I-V カーブの変化が大きくなってしまい、掃引方向が与える影響について正確なデータが得られない。この時の 1 回とは、どちらか一方方向の測定を行いデータを送るところまでのことである。

掃引方向を考慮した測定の実験方法を説明する。各回路を一方方向のみの測定と同様に接続する。マイコンに書き込むプログラムを付録に示す。実験は宮崎大学工学部電気電子棟の屋上で行った。測定は晴れの日、曇りの日の 9 時、12 時、15 時で行った。測定時間はそれぞれ 1 時間とした。

### 3.2 掃引方向の違いの比較方法

掃引方向の違うデータの比較は、基本的な太陽電池の品質の目安とされている曲線因子 (fill factor これ以降 FF と呼ぶ) を用いて行う。FF は、最大出力を開放電圧と短絡電流の積に相当する理論出力と比較して算出する。今回は、最大出力を  $P_{max}$ 、短絡電流を  $I_{sc}$ 、開放電圧を  $V_{oc}$  とすると、

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3.1)$$

で表される。一般的な FF は 0.5~0.82 とされている。この式をもとに晴れの日、曇りの日における 9 時、12 時、15 時の測定値の比較を行う。 $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向を順方向、 $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向を逆方向とする。比較は順方向から逆方向を引くことで行う。

### 3.3 測定方法

測定方法を説明する。回路を全て太陽光パネルボックスの中に入れる。抵抗をそれぞれ回路に接続する。接続した抵抗はパネルの外に出しておく。これは、長時間の測定によって抵抗が熱を持ち過ぎないようにするためである。単に外に出すだけでは太陽の熱で暖められてしまうため、金属製の箱 (箱の横が開いている) の中に抵抗を入れるようにし、さらにその上に木の板を置き金属自体が太陽の熱で暖められないようにする。

太陽光パネルの端子を FET の回路に接続する。マイコンのポート 31~36 を集積回路の入力側の端子に接続し、出力側の端子は FET の端子に接続する。

OP アンプの端子は入力側を FET の回路と接続し、出力側をマイコンのポート 14 に接続する。この端子で電流に相当する値を測定している。マイコンのポート 17 を FET の回路と接続する。この端子では電圧を測定している。ポート 14,17 は A/D コンバータで設定

した端子になっている。プログラム上での ADS=0 がポート 14 に, ADS=3 がポート 17 に対応している。

マイコン, OP アンプ, 集積回路, シリアルにはそれぞれ 5[V] の電源を接続している。5[V] 電源 1 つに三洋電機株式会社製の単 3 形充電式ニッケル水素電池 4 つを用いた。集積回路は 2 つ使用しているため, 電源も 2 つ使用している。

全ての接続を済ませた後に, 太陽光の下に設置し測定を開始する。実験は宮崎大学工学部電気電子棟の屋上で行った。測定時間は 1 時間とした。

#### 4 測定結果

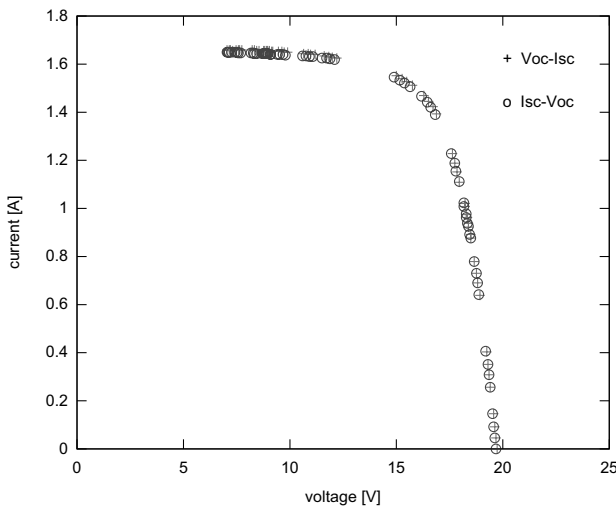


図 4.1: 両方向, 9 時

9 時における  $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向の FF,  $FF_{1.1}$  を求める。 $P_{max}$  は 23.9359[W],  $I_{sc}$  は 1.6587[A],  $V_{oc}$  は 19.7312[V] となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{1.1} &= \frac{23.9359}{1.6587 \times 19.7312} \\ &= 0.731355309 \\ &0.7313 \end{aligned} \quad (4.1)$$

同様に 9 時における  $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向の FF,  $FF_{1.2}$  を求める。 $P_{max}$  は 23.7284[W],  $I_{sc}$  は 1.6496[A],  $V_{oc}$  は 19.6774[V] となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{1.2} &= \frac{23.7284}{1.6496 \times 19.6774} \\ &= 0.731007938 \\ &0.7310 \end{aligned} \quad (4.2)$$

式 (4.1), 式 (4.2) より

$$\begin{aligned} FF_{1.1} - FF_{1.2} &= 0.7313 - 0.7310 \\ &= 0.003 \end{aligned} \quad (4.3)$$

式 (4.3) より, 掃引方向による誤差は 0.003 であった。

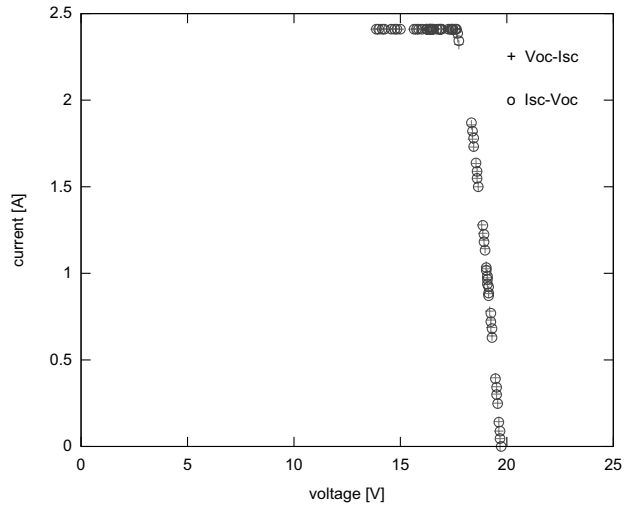


図 4.2: 両方向, 12 時

12 時における  $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向の FF,  $FF_{2.1}$  を求める。 $P_{max}$  は 42.3727[W],  $I_{sc}$  は 2.4102[A],  $V_{oc}$  は 19.6774[V] となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{2.1} &= \frac{42.3727}{2.4102 \times 19.6774} \\ &= 0.893439897 \\ &0.8934 \end{aligned} \quad (4.4)$$

同様に 12 時における  $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向の FF,  $FF_{2.2}$  を求める。 $P_{max}$  は 42.5023[W],  $I_{sc}$  は 2.4102[A],  $V_{oc}$  は 19.7312[V] となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{2.2} &= \frac{42.5023}{2.4102 \times 19.7312} \\ &= 0.893729003 \\ &0.8937 \end{aligned} \quad (4.5)$$

式 (4.4), 式 (4.5) より

$$\begin{aligned} FF_{2.1} - FF_{2.2} &= 0.8934 - 0.8937 \\ &= -0.0003 \end{aligned} \quad (4.6)$$

式 (4.6) より, 掃引方向による誤差は 0.0003 であった。

15 時における  $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向の FF,  $FF_{3.1}$  を求める。 $P_{max}$  は 25.1594[W],  $I_{sc}$  は 1.7595[A],  $V_{oc}$  は 19.6237[V] となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{3.1} &= \frac{25.1594}{1.7595 \times 19.6237} \\ &= 0.728668697 \\ &0.7287 \end{aligned} \quad (4.7)$$

同様に 15 時における  $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向の FF,  $FF_{3.2}$  を求める。 $P_{max}$  は 25.1594[W],  $I_{sc}$  は 1.7626[A],  $V_{oc}$  は

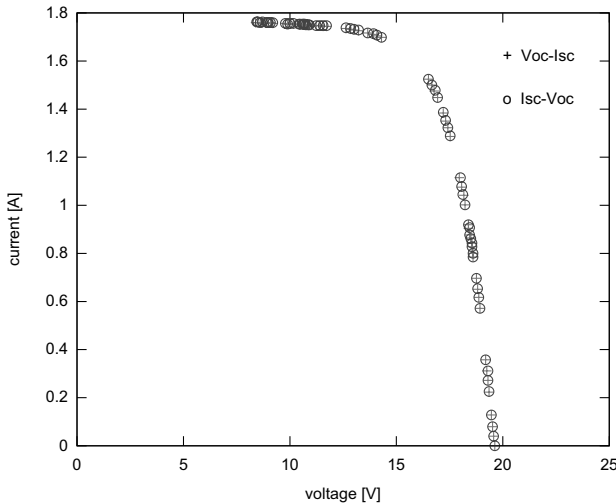


図 4.3: 両方向,15 時

19.6237[V] となり式 (3.1) を用いて

$$FF_{3.2} = \frac{25.1594}{1.7626 \times 19.6237} = 0.728427941 = 0.7284$$

式 (4.7), 式 (4.8) より

$$FF_{3.1} - FF_{3.2} = 0.7287 - 0.7284 = 0.0003 \quad (4.9)$$

式 (4.9) より, 掃引方向による誤差は 0.0003 であった。

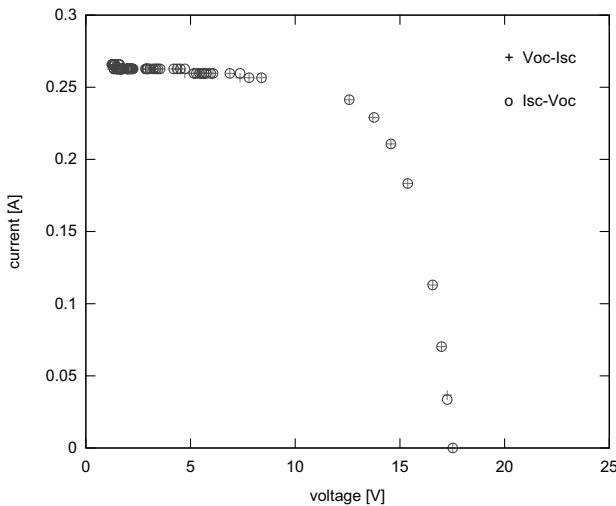


図 4.4: 両方向,9 時

9 時における  $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向の  $FF, FF_{4.1}$  を求める。  
 $P_{max}$  は 3.1410[W],  $I_{sc}$  は 0.2627[A],  $V_{oc}$  は 17.5269[V]

となり式 (3.1) を用いて

$$FF_{4.1} = \frac{3.1410}{0.2627 \times 17.5269} = 0.682185925 = 0.6822 \quad (4.10)$$

同様に 9 時における  $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向の  $FF, FF_{3.2}$  を求める。  
 $P_{max}$  は 3.1533[W],  $I_{sc}$  は 0.2658[A],  $V_{oc}$  は 17.5269[V]  
 となり式 (3.1) を用いて

$$FF_{4.2} = \frac{3.1533}{0.2658 \times 17.5269} = 0.676869906 = 0.6769 \quad (4.11)$$

式 (4.10), 式 (4.11) より

$$FF_{4.1} - FF_{4.2} = 0.6822 - 0.6769 = 0.0053 \quad (4.12)$$

(4.8) 式 (4.12) より, 掃引方向による誤差は 0.0003 であった。

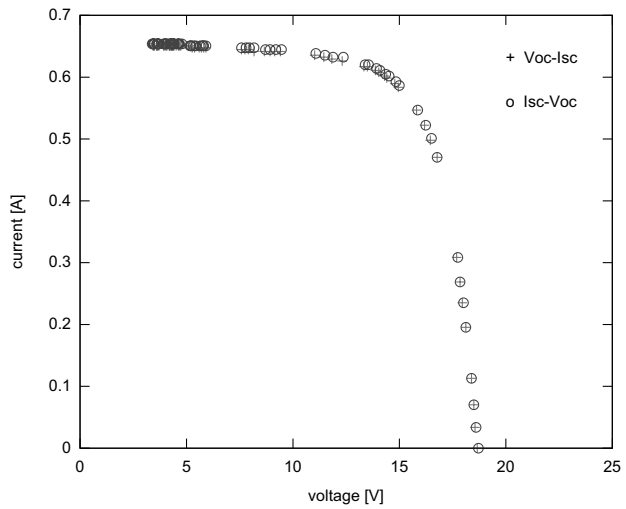


図 4.5: 両方向,12 時

12 時における  $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向の  $FF, FF_{5.1}$  を求める。  
 $P_{max}$  は 8.7205[W],  $I_{sc}$  は 0.6537[A],  $V_{oc}$  は 18.6559[V]  
 となり式 (3.1) を用いて

$$FF_{5.1} = \frac{8.7205}{0.6537 \times 18.6559} = 0.715066935 = 0.7151 \quad (4.13)$$

同様に 12 時における  $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向の  $FF, FF_{5.2}$  を求める。  
 $P_{max}$  は 8.7977[W],  $I_{sc}$  は 0.6537[A],  $V_{oc}$  は 18.7097[V]

となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{5.2} &= \frac{8.7977}{0.6537 \times 18.7097} \\ &= 0.719322822 \\ &0.7193 \end{aligned} \quad (4.14)$$

式 (4.13), 式 (4.14) より

$$\begin{aligned} FF_{5.1} - FF_{5.2} &= 0.7151 - 0.7193 \\ &= -0.0042 \end{aligned} \quad (4.15)$$

式 (4.15) より, 掃引方向による誤差は 0.0042 であった。

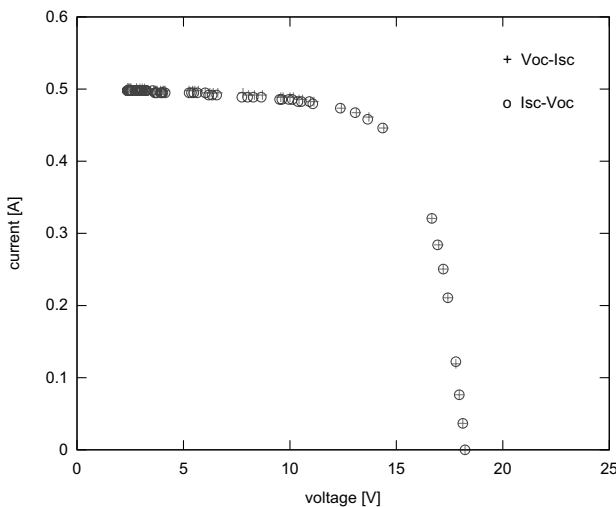


図 4.6: 両方向, 15 時

15 時における  $V_{oc}$   $I_{sc}$  方向の FF,  $FF_{6.1}$  を求める。  
 $P_{max}$  は 6.4021[W],  $I_{sc}$  は 0.5010[A],  $V_{oc}$  は 18.2258[V]  
となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{6.1} &= \frac{6.4261}{0.5010 \times 18.2258} \\ &= 0.703757690 \\ &0.7038 \end{aligned} \quad (4.16)$$

同様に 15 時における  $I_{sc}$   $V_{oc}$  方向の FF,  $FF_{6.2}$  を求める。  
 $P_{max}$  は 6.4021[W],  $I_{sc}$  は 0.4979[A],  $V_{oc}$  は 18.2258[V]  
となり式 (3.1) を用いて

$$\begin{aligned} FF_{6.2} &= \frac{6.4021}{0.4979 \times 18.2258} \\ &= 0.705494654 \\ &0.7055 \end{aligned} \quad (4.17)$$

式 (4.16), 式 (4.17) より

$$\begin{aligned} FF_{6.1} - FF_{6.2} &= 0.7038 - 0.7055 \\ &= -0.0017 \end{aligned} \quad (4.18)$$

式 (4.18) より, 掃引方向による誤差は 0.0017 であった。

## 5 まとめ

測定結果より, 電圧の測定値はどの時間帯も最大値が 20[V] 近くあるのに対して, 電流値は天候や時間帯によってかなりのばらつきがあることが読み取れる。つまり, 最大電力が天候や時間帯によって大きく変化する原因の一つは電流値の変化によるものであると考えられる。

最大誤差は曇りの日測定時間 9 時の 0.0053 であった。この誤差の原因の一つとして, 曇りの日の測定において太陽光の照射量は一定ではなく, 太陽電池パネルに照射される太陽光が一時的に変化したことが考えられる。実験結果からも解るように掃引方向の違いによる誤差は 1% 未満であった。このことから, 本実験において掃引方向のちがいが I-V カーブ特性に与える影響はほとんどないと言える。

本研究では, 掃引方向の違いに着目し実験を行った。今後は, 掃引時間の違いが I-V カーブに与える影響について検討してみる必要がある。また今回は冬のデータしか取れていないため, ほかの季節のデータもとる必要があると考えられる。その際, 太陽電池の種類を増やし, 種類別の詳細な検討が必要である。例えば, 色素増感型太陽電池は掃引時間, 掃引方向の違いによって受ける影響が大きいことが知られている。この効果は太陽電池の材料だけでなく構造にも影響されるものであり, 個別の確認が必要である。その詳細なメカニズムを含めて更なる研究が必要である。

## 参考文献

- [1] 新道一弘 菱川善博: 各種太陽電池モジュール測定時の掃引時間と掃引方向が電流電圧特性に及ぼす影響, 太陽/風力エネルギー講演論文集, (2009)
- [2] 平井大雅: 太陽電池・電気的特性シミュレータの開発, 電気電子工学科卒業論文, (2009)
- [3] 山本昌志: gnuplot の精義, 株式会社カットシステム, (2009)
- [4] 林晴比古: 新訂新 C 言語入門, ソフトバンククリエイティブ株式会社, (2006)
- [5] 小林久恵三和義秀共著: C 言語プログラミングのテクニック, 共立出版株式会社, (2005)