

J4 情報システム実験実習 実験報告書

題目

太陽電池の電気特性測定

実施年月日 2025年05月16日天候晴れ 温度 25 °C 湿度 52 %

2025年05月23日天候晴れ 温度 28 °C 湿度 60 %

提出年月日 2025年5月30日

共同実験者 6班

長尾 侑樹 見山 瑠空 宮本 亜蓮 嘉本 万桜里 アヌ

提出者

通し番号 17

学籍番号 22059

氏名 来間空

1. 原理

太陽電池は太陽光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する装置であり、太陽光発電で主に使用される。太陽電池は主に半導体でできているため、太陽電池を説明するにはまず、半導体の仕組みについて理解する必要がある。基本的に太陽電池はP-N接合と呼ばれる、N型半導体とP型半導体が重なり合わさせて形成されている。N型半導体はマイナスの電気を帯びた自由電子が多く、P型半導体はプラスの電気を帯びた正孔が多い。ここに太陽光が照射されると、N型半導体には自由電子が、P型半導体には正孔が集まり、プラス極とマイナス極が形成される。そして電子の流れができ、電気が通るといった仕組みである。これは、物体に光を当てるとその物質から電子が外に飛び出してしまう「光電効果」を利用したものである[1]。

太陽電池の中でも種類は様々で、様々な用途に応じて使用される材料や構造は異なる。太陽電池の材料による分類を図1に示す[2]。

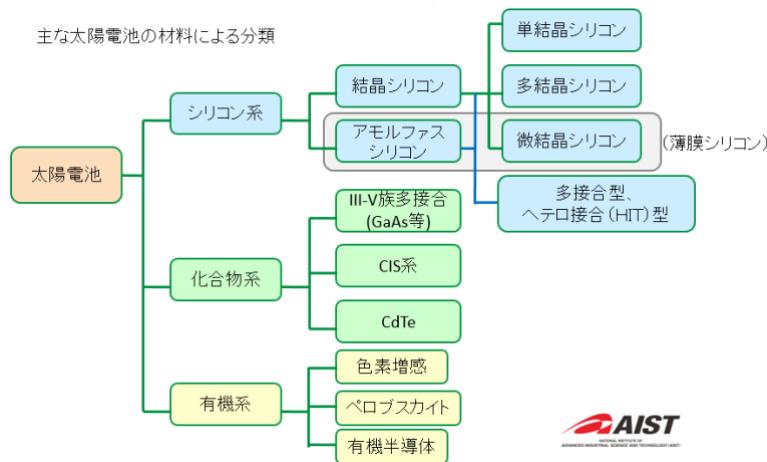


図1 太陽電池の材料による分類[2]

図1より、細かく分けていくと数十種類にもなるが、大まかにシリコン系、化合物系、有機系に分類できる。シリコン系は最も広く使われており、シリコンとは元素の一種であるケイ素のことである。中でもシリコン系はケイ素を使用しており、ケイ素は世界中に豊富に存在するため、制作コストを低く済ませることができる。そのため、太陽電池の中で最も主流となっている。しかし、シリコン系はエネルギー消費量が高いこともあり、他の種類の材料にも注目が集まっている。化合物系は、薄い膜でも十分な光を吸収できる薄膜太陽電池として使えるなど、軽量、柔軟な応用が可能である。また、その中でもGaAsはエネルギー変換効率が約29.1%と単接合太陽電池としては最も高い変換効率である[3]。有機系はシリコンなどの無機系と違い、炭素を含む化合物を使った太陽電池である。通常無機系では、製造行程のどこかである程度高い温度にしてやる必要が生じたり、真空装置を使う必要が生じたりする。有機系はこれが常温・常圧で製造で製造でき、その分コストダウンが可能になるというのが利点である[4]。また軽量であるため、ウェアラブル端末や、IoTセンサなどにも使われる。

太陽電池で重要な要素は変換効率と曲線因子である。変換効率は光エネルギーに対して電気エネルギーをどれだけ変換できたものかを表すものであり、変換効率： η 、入射する太陽光の光エネルギー： P_{in} 、太陽電池から得られる最大出力電力： P_{max} とすると、

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 [\%]$$

と表せる。ここで、2025年の企業の市販結晶型Si太陽電池のチャートを表1に示す[5]。

表1 2025年の企業の市販結晶型Si太陽電池のチャート[5]

| # | Make | Model | Power | Efficiency |
|----|----------------|--------------------|-------|------------|
| 1 | Aiko Solar | Neostar 2P | 485 W | 24.3 % |
| 2 | Maxeon | Maxeon 7 | 445 W | 24.1 % |
| 3 | Jinko Solar | Tiger NEO | 515 W | 23.8 % |
| 4 | Recom Tech | Black Tiger Series | 460 W | 23.6 % |
| 5 | SPIC | Andromeda 3.0 | 460 W | 23.6 % |
| 6 | Longi Solar | Hi-Mo 6 Scientist | 455W | 23.3 % |
| 7 | Huasun Solar | Himalaya G12 | 450 W | 23.0 % |
| 8 | Canadian Solar | TOPHiKu6 | 470 W | 23.0 % |
| 9 | Winaico | WST-NGX-D3 | 450 W | 23.0 % |
| 10 | Trina Solar | Vertex S+ | 455 W | 22.8 % |

* Last update: March 2025. Residential size panels - 54 to 66 cells (108-HC, 120-HC or 132-HC) and 96/104 cell formats. Does not include commercial panels greater than 2.0m in length.

表1より、変換効率は22.8%から24.3%の範囲となっている。

曲線因子は太陽電池の理想的な最大出力に対する実際の最大出力の割合であり、I-V特性曲線（電流-電圧曲線）で、どれだけ「四角形に近い」かを示す。因子曲線：FF、最大出力点の電圧・電流： V_{mpp}, I_{mpp} 、開放電圧（無負荷時の電圧）： V_{oc} 、短絡電流（電圧ゼロ時の最大電流）： I_{sc} 、とすると、

$$FF = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

この数式より、数値が1に近づくほど理想に近づく。

ここで、太陽電池の等価回路を図2に、I-V特性を図3に示す[6]。

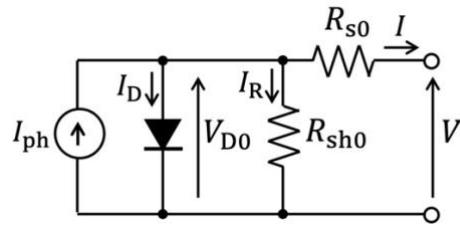


図2 太陽電池の等価回路[6]

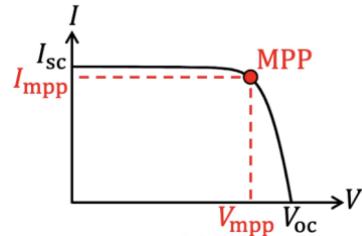


図3 I-V特性[6]

図3より、 V_{mpp} が一定値まで増加すれば、 I_{mpp} が急激に減少することがわかる。つまり、電流が下がりすぎないように、電圧を調整することが必要である。

2. 実験方法

- 2.1 配布した資料（温度センサおよび電流センサのデータシートおよび太陽電池資料）から、太陽電池セルによって生じる電流と電圧および太陽光パネル裏面の温度を測る測定回路図をノートに描いた。この時、太陽電池は等価回路で示した。測定回路図は後の考察 5.1 で示す。太陽電池セルの背面に温度センサチップが接触するように仮止めテープで貼り付けた。この時、仮止めテープはしっかりと貼った。また、マイコンボードなどのむき出しの半導体素子に電荷（静電気）を帯びた手が触れると、高電界によって破壊があるため、静電気除去シートに触れてから作業に取り掛かった。センサにより温度が測れていることを、アクティブラボラトリーに設置されている温度計の値も見ながら確かめた。
- 2.2 2台の Arduino の電源 ON にし、LCD ボードが正常に表示されることを確かめた、また、一台は電流・電圧を表示し、もう一台は温度を表示するかを確認した。また、画面が暗く数値の確認が難しかったため、Arduino のメモリを調整することで明るさ上げた。その後、LED 電球の光を太陽電池セルに当てた。このとき、太陽電池と電球とは対向するように位置を調整する。また、電球にアルミホイルを被せる（疑似的に平行光を当てることができる）。アルミホイルは一枚ではなく、光が漏れないように複数枚でしっかりと被せた。特に、底面に光が漏れ出さないようにした。半固定抵抗を 1 目盛りずつ変化させながら（目盛りに番号をつけると良い）、太陽電池セルから生じる電流、電圧と温度を測定した。この時 Arduino のモニタではそれぞれ電流が A、電圧が V、温度が°C の単位で表示されている。したがって、それぞれの有効数字は、電流、電圧は 3 衔、温度は 4 衔で計測した。この測定は 3 人で行ったが、私が Excel で記録をし、後の二人がそれぞれのモニタに表示されている値を読み上げて役割分担をした。
- 2.3 I-V 特性（横軸電圧 V、縦軸電流 I）および P-V 特性（横軸電圧 V、縦軸電力 P）を Excel で描画し、最も電力が高く得られた半固定抵抗の値を求め、その目盛りに固定した。この時、電力と抵抗の有効数字は 3 衔として記録した。
- 2.4 2.3 の半固定抵抗の値で、電流・電圧・温度をそれぞれ LED 電球と白熱電球で計測した。計測時間は 900 秒とし、15 秒毎に計測した。ただし、温度が 48°C を超えた場合、直ちに電球の電源を OFF し、太陽電池モジュールをうちわで冷却した。ただし、白熱電球は 1 回目の測定の時、60 秒ほどで 48°C を超えてしまったため、再度 5 秒毎に計測し直した。電流・電圧は有効数字 3 衔で、温度は有効数字 4 衔で計測した。は 2.2 と同じような役割で計測した。白熱電球の測定では直接 5 秒毎で計測するのは難しかったため、動画を撮影して、その動画上の数値を記録した。
- 2.5 LED 電球および白熱電球の 2 つの測定結果を横軸時間、縦軸電力で描画した。実験指示書には、1 つのグラフで描画する方が良いと記載されていたが、横軸のスケールが二つのグラフで違い、1 つにして描画するのは難しいので、別々に描画した。

3. 使用機器

- Arduino UNO (LCD シールドつき)

Arduino srl 製 Arduino UNO R3 (A000066, 2012 年発売) は 10 bit ADC (0–5 V, 4.9 mV/LSB) と I^C 100 kHz を用い LCD キーパッドシールドで電圧, 電流, 電力, 温度をリアルタイム表示した。

- 電流センサ INA260 モジュール (詳細はデータシート)

Texas Instruments 製 INA260 (2016 年 Rev.C) は 2 mΩ シャントで ±15 A, 0–36 V を 16 bit ΔΣ ADC (1.25 mA/1.25 mV LSB) で測定し, I^C 経由で電流, バス電圧, 電力を取得した。

- 温度センサ LM35DZ

Texas Instruments 製 LM35DZ (2018 年 Rev.H) は −55–150 °C を 10 mV/°C で出力し, Arduino の 5 V リファレンスで −55–110 °C を 0.5 °C 刻みで読み取りセル温度を計測した。

- 太陽電池セル (多結晶 Si : 最大出力電力 0.57 W、開放電圧 1.7 V、短絡電流 415 mA)

Artec 製 多結晶 Si 太陽電池セル 8365 (2023 年カタログ) は V_{oc} 1.7 V, I_{sc} 415 mA, P_{max} 0.57 W を持ち, INA260 と可変抵抗負荷で I-V 特性および出力電力を求めた。

- 半固定抵抗 (100 Ω および 1 kΩ)

Bourns 3296W 半固定抵抗 (100 Ω/1 kΩ, 2019 年ロット) は 25 回転トリマ 0.5 W を負荷調整および LM35 分圧校正に用い抵抗値で電流と電圧を制御した。

- LED 電球 (100 W 形相当、全光束 1,600 lm、消費電力 12.3)

アイリスオーヤマ LDA12D-G-10T6 (2021 年モデル) は 12.3 W で全光束 1600 lm, 色温度 6500 K を出し, 30 cm で約 5 klx の照度を与えてセル発電を評価した

- 白熱電球 (100 W、全光束 1,520 lm)

ヤザワ LW100V100WWL (2024 年現行) 白熱電球は 100 W で全光束 1520 lm, 色温度 2700 K を発し, 高い放射熱によりセル温度上昇を LED 比 +8 °C として温度依存性比較に利用した。

- ブレッドボード

- 配線材

4. 結果

実験手順 2.2 より, 半固定抵抗を 1 目盛りずつ変化させながら, 太陽電池セルから生じる電流, 電圧と温度を測定した表を表 2 に示す。

表 2 太陽電池の電流, 電圧と温度

| 目盛り | 電流[A] | 電圧[V] | 温度[°C] |
|-----|--------|--------|--------|
| 1 | 0.0800 | 0.0200 | 30.52 |
| 2 | 0.0800 | 0.290 | 30.79 |
| 3 | 0.0800 | 1.32 | 31.28 |
| 4 | 0.0600 | 1.63 | 31.77 |
| 5 | 0.0400 | 1.67 | 32.36 |
| 6 | 0.0300 | 1.67 | 32.75 |
| 7 | 0.0200 | 1.67 | 33.24 |
| 8 | 0.0200 | 1.68 | 33.72 |
| 9 | 0.0200 | 1.66 | 33.24 |
| 10 | 0.0100 | 1.66 | 32.75 |
| 11 | 0.0100 | 1.66 | 33.24 |

また, 表 2 より求めた電力と抵抗を表 3 に示す。

表3 表2より求めた電力と抵抗

| 目盛り | 抵抗 | 電力 W |
|-----|-------|---------|
| 1 | 0.250 | 0.00160 |
| 2 | 3.62 | 0.0230 |
| 3 | 16.5 | 0.105 |
| 4 | 27.1 | 0.0978 |
| 5 | 41.7 | 0.0668 |
| 6 | 55.6 | 0.0501 |
| 7 | 83.5 | 0.0334 |
| 8 | 84.0 | 0.0336 |
| 9 | 83.0 | 0.0332 |
| 10 | 166 | 0.0166 |
| 11 | 166 | 0.0166 |

表3より、電力が最も高くなるのは3目盛りの時の 0.1056W であり、その時の半固定抵抗の値は 16.5Ω であることがわかる。次に、2.3 の半固定抵抗の値で、それぞれ LED 電球と白熱電球の電流・電圧・温度を計測した結果を表4,表5に示す。

表4 2.3 の半固定抵抗の値による LED 電球の電流・電圧・温度

| LED | 電流(A) | 電圧(V) | 温度(°C) |
|-----|-------|-------|--------|
| 時間 | 電流(A) | 電圧(V) | 温度(°C) |
| 15 | 0.120 | 1.54 | 34.70 |
| 30 | 0.120 | 1.54 | 34.70 |
| 45 | 0.120 | 1.54 | 34.70 |
| 60 | 0.120 | 1.54 | 34.70 |
| 75 | 0.120 | 1.54 | 35.20 |
| 90 | 0.120 | 1.54 | 35.70 |
| 105 | 0.120 | 1.54 | 35.70 |
| 120 | 0.120 | 1.54 | 35.70 |
| 135 | 0.120 | 1.54 | 36.20 |
| 150 | 0.120 | 1.54 | 36.20 |
| 165 | 0.120 | 1.54 | 36.20 |
| 180 | 0.120 | 1.54 | 36.20 |
| 195 | 0.120 | 1.54 | 36.20 |
| 210 | 0.120 | 1.54 | 36.20 |
| 225 | 0.120 | 1.53 | 36.20 |
| 240 | 0.120 | 1.53 | 36.20 |
| 255 | 0.120 | 1.53 | 36.66 |
| 270 | 0.120 | 1.53 | 36.66 |
| 285 | 0.120 | 1.53 | 36.66 |
| 300 | 0.120 | 1.53 | 36.66 |
| 315 | 0.120 | 1.53 | 37.15 |
| 330 | 0.120 | 1.53 | 37.15 |
| 345 | 0.120 | 1.53 | 37.15 |
| 360 | 0.120 | 1.53 | 37.15 |
| 375 | 0.120 | 1.53 | 37.15 |
| 390 | 0.120 | 1.53 | 37.15 |
| 405 | 0.120 | 1.53 | 37.63 |
| 420 | 0.120 | 1.53 | 37.63 |
| 435 | 0.120 | 1.52 | 37.63 |
| 450 | 0.120 | 1.52 | 38.12 |
| 465 | 0.120 | 1.52 | 38.12 |
| 480 | 0.120 | 1.52 | 38.12 |
| 495 | 0.120 | 1.52 | 38.61 |
| 510 | 0.120 | 1.52 | 39.10 |
| 525 | 0.120 | 1.52 | 39.10 |
| 540 | 0.120 | 1.52 | 39.10 |
| 555 | 0.120 | 1.52 | 39.51 |
| 570 | 0.120 | 1.52 | 39.59 |
| 585 | 0.120 | 1.52 | 39.59 |
| 600 | 0.120 | 1.52 | 39.59 |
| 615 | 0.120 | 1.52 | 39.59 |
| 630 | 0.120 | 1.52 | 39.59 |
| 645 | 0.120 | 1.52 | 40.08 |
| 660 | 0.120 | 1.52 | 40.08 |
| 675 | 0.120 | 1.52 | 40.08 |
| 690 | 0.120 | 1.52 | 40.08 |
| 705 | 0.120 | 1.52 | 40.08 |
| 720 | 0.120 | 1.52 | 40.57 |
| 735 | 0.120 | 1.51 | 40.57 |
| 750 | 0.120 | 1.51 | 40.57 |
| 765 | 0.120 | 1.51 | 40.57 |
| 780 | 0.120 | 1.51 | 40.57 |
| 795 | 0.120 | 1.51 | 40.57 |
| 810 | 0.120 | 1.51 | 40.57 |
| 825 | 0.120 | 1.51 | 40.57 |
| 840 | 0.120 | 1.51 | 41.06 |
| 855 | 0.120 | 1.51 | 41.06 |
| 870 | 0.120 | 1.51 | 41.06 |
| 885 | 0.120 | 1.51 | 41.06 |
| 900 | 0.120 | 1.51 | 41.06 |

表5 2.3 の半固定抵抗の値による白熱電球の電流・電圧・温度

| 時間[s] | 電流[A] | 電圧[V] | 温度[°C] |
|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 36.17 |
| 5 | 0.140 | 1.76 | 36.66 |
| 10 | 0.140 | 1.74 | 38.12 |
| 15 | 0.140 | 1.74 | 39.10 |
| 20 | 0.140 | 1.72 | 40.57 |
| 25 | 0.130 | 1.71 | 42.03 |
| 30 | 0.130 | 1.71 | 43.01 |
| 35 | 0.130 | 1.70 | 43.99 |
| 40 | 0.130 | 1.69 | 44.48 |
| 45 | 0.130 | 1.68 | 45.45 |
| 50 | 0.130 | 1.67 | 46.43 |
| 55 | 0.130 | 1.66 | 47.41 |
| 60 | 0.130 | 1.65 | 48.39 |

5. 考察

5.1 今回の実験で使用した測定回路図を図4に示す。

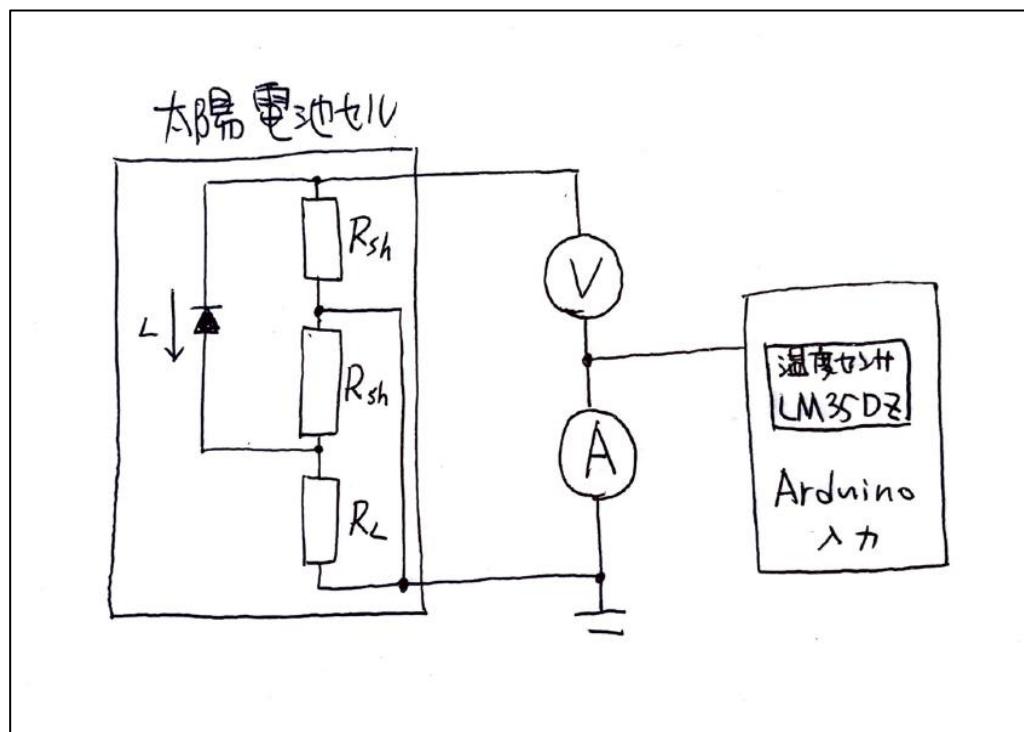


図4 測定回路図

5.2 2.3 より、I-V 特性（横軸電圧 V , 縦軸電流 I ）および P-V 特性（横軸電圧 V 、縦軸電力 P ）をそれぞれ、図 5 , 図 6 に示す.

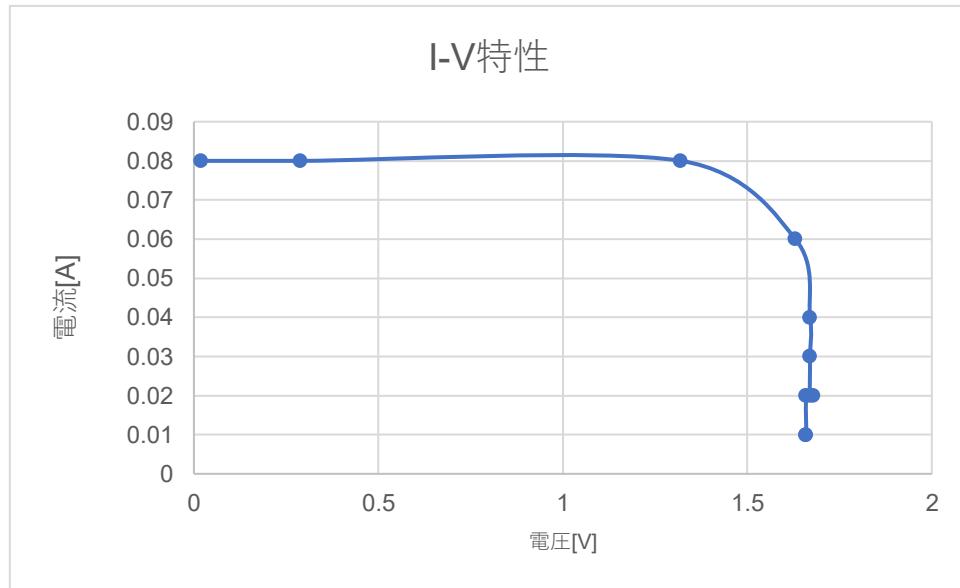


図 5 I-V 特性

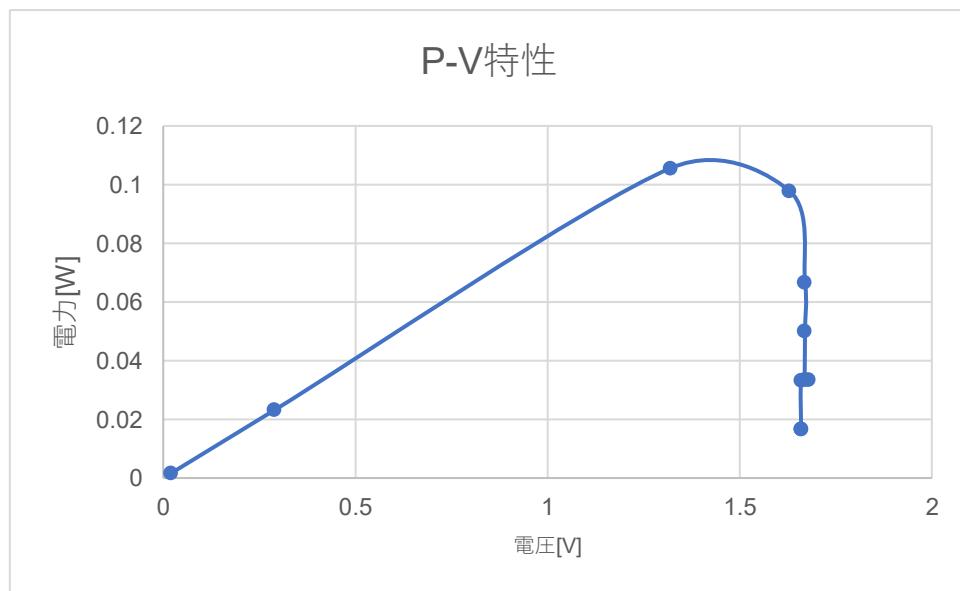


図 6 P-V 特性

電力は電圧と電流の積でも止めることができる. 図 5 より、最も電力が得られる地点は 2.3 より、 0.1056W であり、電流と電圧の積が最も大きい地点である. これを最大出力点と呼ぶ. よって、一般的には電流も電圧も値が大きければ大きいほど高い電力を得ることができるが、この I-V 特性は電圧が一定の値を超えると電流が急激に下がっていることがわかる. R:負荷抵抗, V:電圧, I:電流とすると、オームの法則より、

$$R = \frac{V}{I}$$

と表せるため、最大出力点での電流、電圧で計算される抵抗 16.5Ω (2.3 より) がこの太陽電池の最

適負荷抵抗である。また、図6より、P-V特性でも電圧がある一定値を超えると電力が下がってしまうことが確認できる。この時の負荷抵抗RはV:電圧、P:電力とすると、

$$R = \frac{V}{P} = \frac{V^2}{p}$$

と表せる。よって最大出力点で計算された負荷抵抗が最適な値となる。この負荷抵抗 16.5Ω は目盛り3の時の値であり、これは3番目に小さい値である。よって、最大電力を得るために負荷抵抗は単に小さければいいということではなく、最大電力になるように適切に負荷抵抗を調整するべきであるということがわかる。

- 5.3 次に2.5より、LED電球および白熱電球を横軸時間、縦軸電力で描画した2つの測定結果をそれぞれ図7、図8に示す。

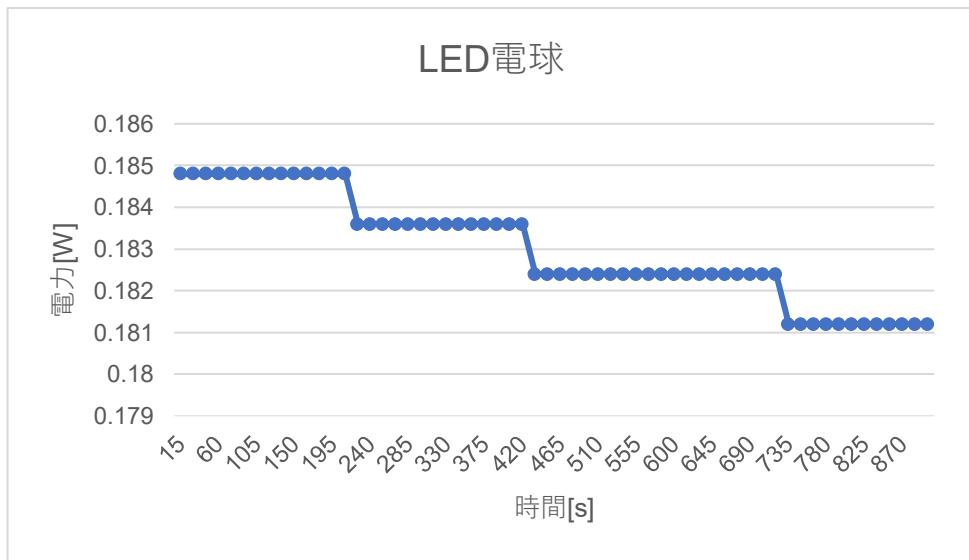


図7 LED電球の時間と電力の関係

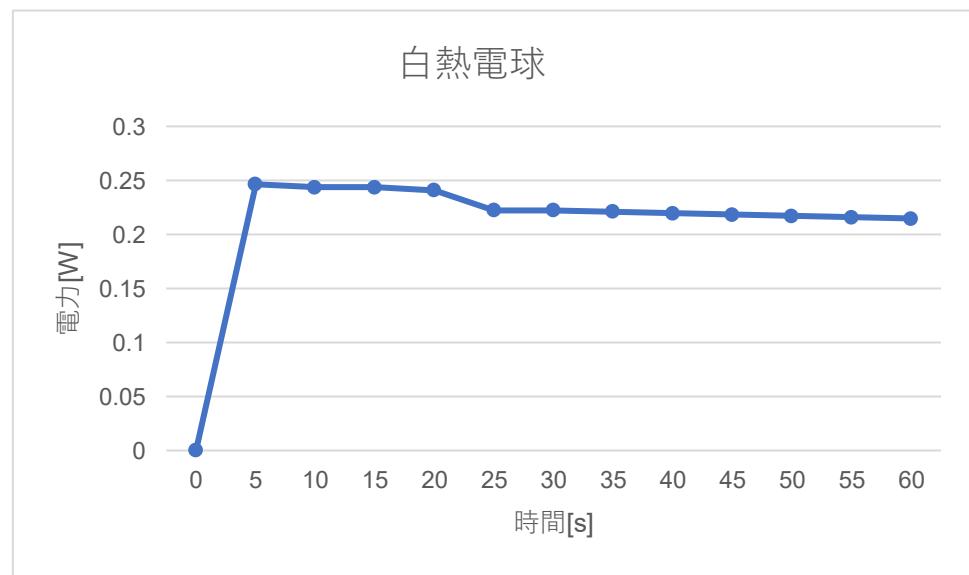


図8 白熱電球の時間と電力の関係

図7より、時間が経過していくにつれて電力は少なくなっていることがわかる。また、電力の下がり方も一定の値から急激に下がるという動作を繰り返しており、非線形な動作であるということがわかる。図8より、計測してから0秒から5秒の間で電力が著しく上がっていることがわかる。これは電流を流したことによりフィラメントが加熱され、電力が一気に上昇したためだと思われる。よって安定して動作するのはLED電球の方だと思われる。また、LED電球は最大で0.185W消費されるのに対し、白熱電球は最大で0.25W消費されるため、LEDの方は消費が少ないということがわかる。

次に、LED電球と白熱電球の時間経過による温度の変化を表すグラフを図9、図10に示す。

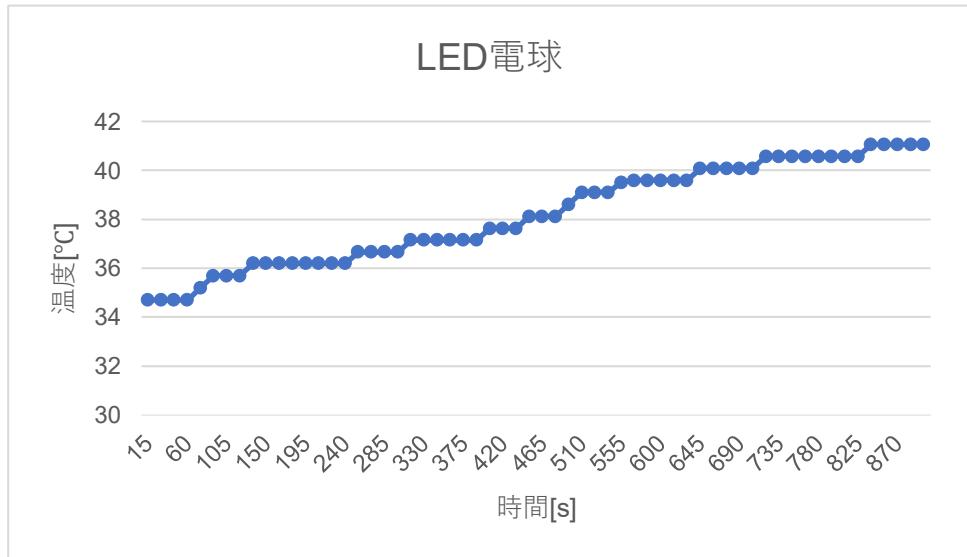


図9 LED電球の時間経過による温度の変化

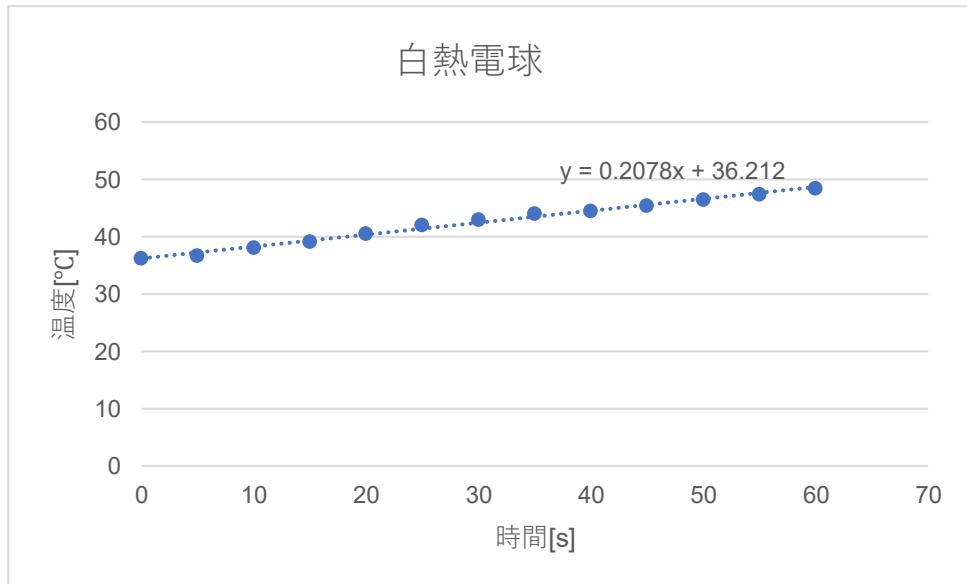


図10 白熱電球の時間変化による温度の変化

図9より、時間経過による温度の上がり方は一定の値を保ち、ある地点で上昇するというのを繰り返しているような非線形な動作をしている。また、900秒が経っても温度は34.70°Cから41.06°Cと、6.9°C上昇していることがわかる。一方で図10は線形な温度上昇を示しており、また、温度の上がり幅は60秒までに36.17°Cから48.39°Cまでと12.22°Cも上昇している。この実験は温度が48°Cを超えた後で中断される。ただし、比較として白熱電球の実験を900秒まで続行したとして線形予測し、近似曲

線の x に 900 を代入すると、

$$y = 0.2078 \cdot 900 + 36.212 = 223.232[\text{°C}]$$

と予測できる。この結果より、白熱電球の温度上昇はLED電球よりも激しいことが確認できる。最後に、温度と電力の関係について考察する。LED電球と白熱電球の温度と電力の関係を図11、図12に示す。

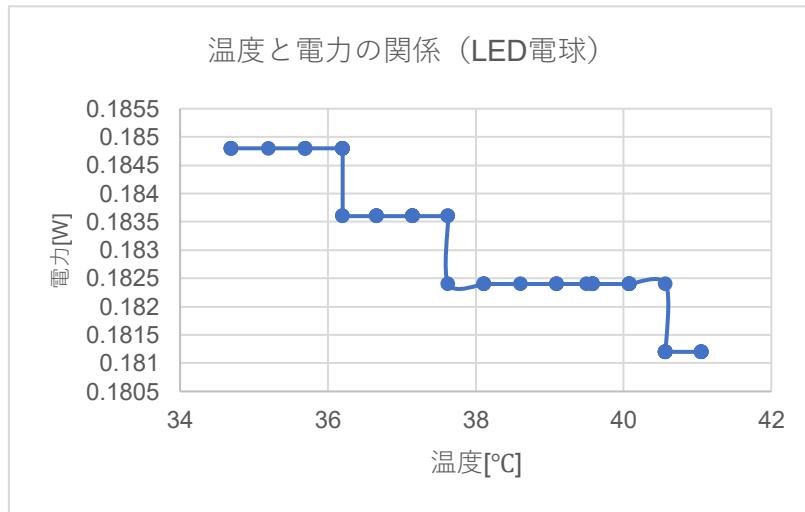


図 11 LED 電球による温度と電力の関係

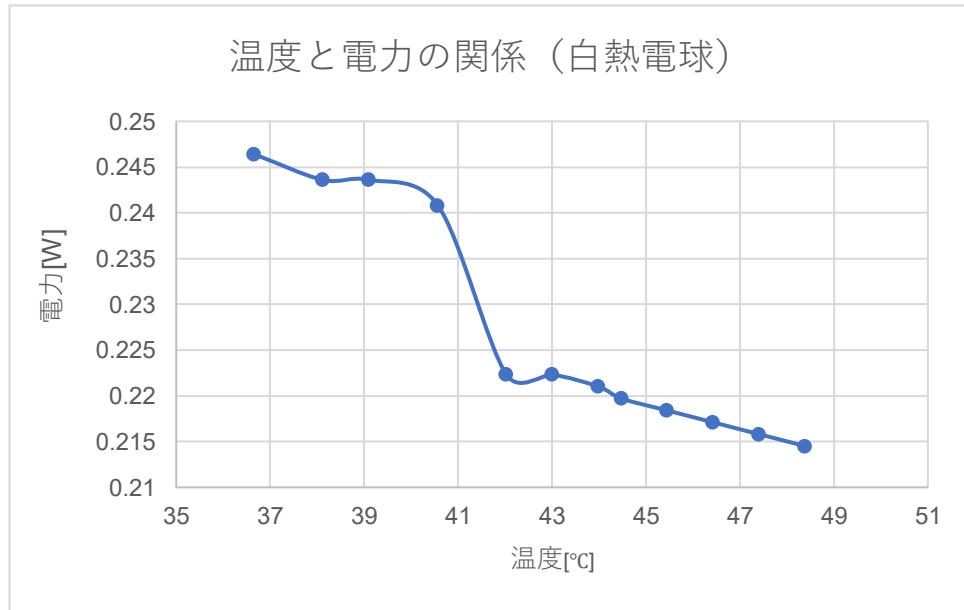


図12 白熱電球による温度と電力の関係

図11より、温度が上昇するにつれて、一定の値から急激に下がるという動作を繰り返していることがわかり、全体的に電力は減少している。図12も同様に温度が上がるにつれて、電力は減少している。よって、高い電力を維持するためには温度を上げすぎてはいけないということである。つまり、高い気温での太陽電池の使用は効率的でないため、例えば砂漠地帯などの常に高温な地域や、夏などの暑い季節ではあまり適さないということがわかる。

5.4 LED 電球と白熱電球とで発光原理がどう異なるか、それによって熱の生じ方がどう異なるかを考察する。まず LED 電球は LED チップに順方向の電圧をかけると、LED チップの中を電子と正孔が移動し電流が流れる。移動の途中で電子と正孔がぶつかると結合し、再結合された状態では、電子と正孔がもともと持っていたエネルギーよりも、小さなエネルギーになる。そのときに電子が保有しているエネルギーの一部が光のエネルギーに変換され発光する[7]。これが LED の発光原理である。白熱電球は内部のタングステンなどの金属フィラメントに電流を流すことで発光する。タングステンは電気抵抗が大きく、電流を流すと白熱する。電気抵抗が大きいと熱をもつのは、中を流れる電子と物質による摩擦があるからで、摩擦熱を発し、高温になると光を発生するという仕組みである[8]。白熱電球による発光は基本的に熱によって光を生む方法であるため、入力された電気エネルギーの 90% 以上が熱エネルギーとして失われ、光として利用されるのはごくわずか（効率 10%程度）である。そのため、白熱電球は非常に発熱量が大きく、電球本体が熱くなる。それに対し LED 電球の発光は、電気エネルギーの多くが直接光に変換されるため、効率が一般に 30~50%以上と非常に高い。ただし、完全に熱が出ないわけではなく、半導体素子の動作によって発生するジュール熱がある。そのため、放熱用のヒートシンクが必要になることもあるが、全体としての発熱量は白熱電球に比べてはるかに少ない[9]。

6. 実験方法（2周目）

- 6.1 2.3 で最も電力が高く得られた半固定抵抗の値を用いて太陽電池に LED 電球を照射し、傾斜角を 0° から 90° まで変化させて電流、電圧、温度の値を測定した。電流は有効数字 1 桁、電圧は有効数字 3 桁、温度は有効数字 4 桁で計測した。この時、0° から 90° まで 10° ずつあげ、10 ステップで計測した。角度を計測するときはスマートフォーン上の分度器アプリを使用した。
- 6.2 動画（資料もアップ済み）を観て Excel シートに入力し、発電電力シミュレーションを行った。動画 URL は「4J 実験実習：地域の発電電力見積もり」<https://youtu.be/xWyDXR9xD14> である
- 6.3 MATLAB Online を用いて太陽電池 P-V カーブのシミュレーションを行った。MATLAB Online コマンドウィンドウに「`openExample('simscapeelectrical/SolarCellPowerCurveExample')`」というコマンドを入力・実行した。以下、表示された MATLAB/Simulink の太陽電池セルの Simscape モデルを用い、以下の動画を参考にしながら P-V 特性の温度依存性を確認した。
- 6.4 MATLAB Online 上で I-V 特性を描画した。動画 URL は「4J 実験実習：MATLAB Online 太陽電池シミュレーション」<https://youtu.be/-Wmx3nZdCiY> である。

7. 実験結果（2周目）

6.1 の実験より、最も電力が高く得られた時の、LED 電球を太陽電池に当てた時の傾斜角による電流、電圧、温度の表を表 6 に示す。

表 6 傾斜角を変えた時の電流、電圧、温度

| 角度[°] | 電流[A] | 電圧[V] | 温度[°C] |
|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 0.01 | 0.220 | 27.68 |
| 10 | 0.03 | 0.570 | 28.35 |
| 20 | 0.05 | 0.750 | 28.35 |
| 30 | 0.06 | 0.910 | 29.33 |
| 40 | 0.06 | 0.970 | 29.33 |
| 50 | 0.1 | 1.44 | 29.81 |
| 60 | 0.1 | 1.50 | 31.77 |
| 70 | 0.1 | 1.57 | 32.26 |
| 80 | 0.1 | 1.58 | 31.77 |
| 90 | 0.1 | 1.54 | 31.28 |

ここから電力を求め、傾斜角による、電力の変化を表すグラフを図 1 3 に示す。

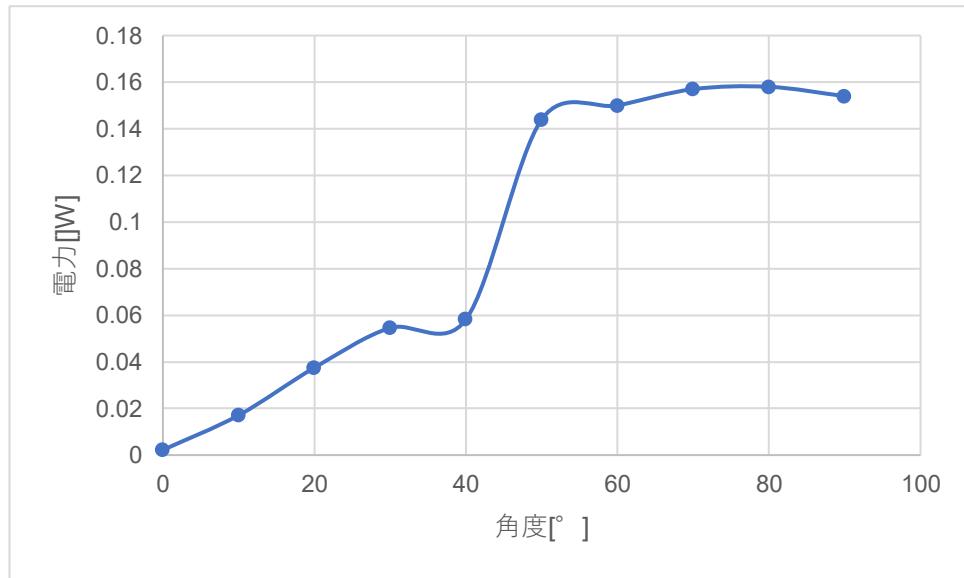


図 1 3 傾斜角による電力の変化

図 1 3 より、傾斜角が 90° に近づくほど、電力の値は大きくなっていることがわかる。また 7.3 より、MATLAB online を用いてシミュレーションした際の P-V 特性を図 1 4 に示す。

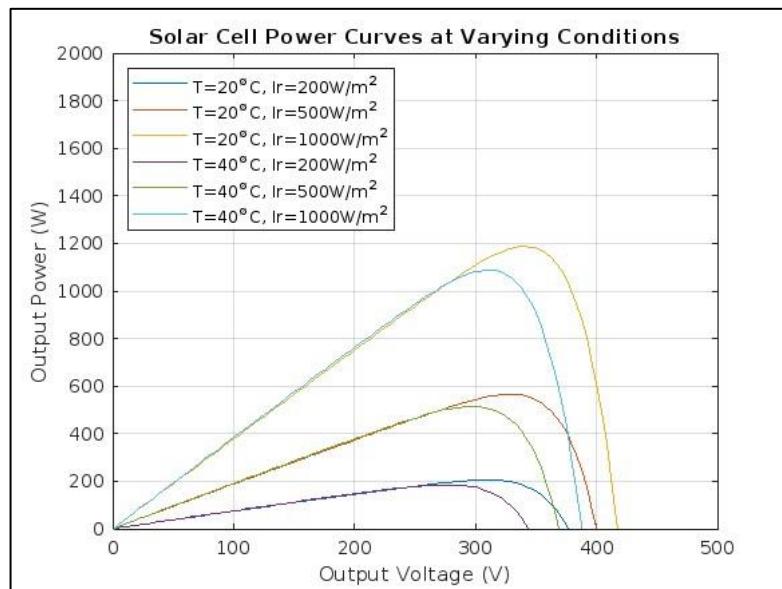


図 1 4 シミュレーションによる P-V 特性

また、同様にして、シミュレーションによって得られた I-V 特性を図 1 5 に示す。

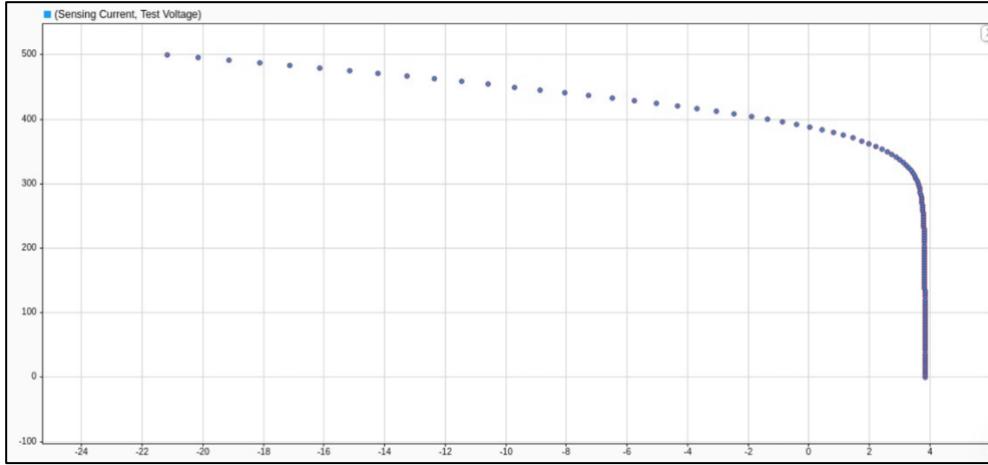


図15 シミュレーションによるI-V特性

8. 考察（2周目）

8.1 6.2の結果より、発電量をできるだけ増やすには、年間発電量について考察する必要がある。まず[10]より、年間発電量 E は

$$E = G_{POA} \times A \times \eta \times PR \times N \times 365$$

で決まり、ここで G_{POA} はパネル面が一日に受け取る平均日射量、 A は1枚当たりの受光面積、 η は変換効率、 PR は損失計数、 N は設置枚数である。ただし、損失計数はどちらも 0.8 であり、受光面積とパネル枚数は前提条件として与えられているため今回のシミュレーションでは関係しないパラメータである。このことから年間発電量に必要な物理量は平均日射量、変換効率である。この中で最も発電量に影響がある物理量は平均日射量である。[11]より、日本の中で日射量が最も高い地域は山梨県北杜市であり、平均日射量は 5.04(kWh/(m²・日))である。また、最も日射量が低い北海道美瑛町では平均日射量が 2.93(kWh/(m²・日))と最も日射量が多い地域は最も日射量が少ない地域に比べ、2倍近くの差が出ている。変換効率は改良しても多くて 10 ~ 20% 程度の改善が限界というところから、日射量ほどの影響はないと考える。すなわち、平均日射量が最も高いのはどのような場所が良いのか考察する必要がある。まず、前提としてパネルが太陽に対して垂直に近い角度になる程、単位面積あたりに受ける日射量が最大になる。そして、地球は傾いて回っているため、太陽の南中高度が緯度によって大きく変わる。よって、最適傾斜角は緯度 + 0 ~ 5° 傾ける必要がある。しかし、実際に北海道美瑛町では積雪地では晴天日射量が 40% 近く減るために、着雪を減らすため、最適傾斜角よりも傾ける必要があるため、積雪地域を避ける必要がある。また、山梨県北杜市は盆地で平らな地形であるため、大規模なパネルの設置では好条件であると言える。温度について言及すれば、気温が高いと電力は下がってしまうため、発電に最適な気温で発電を行うことが重要である。では、どのような太陽光パネルが性能面でいいのか考察する。[12]より、Si 単結晶、Si 多結晶、CIS の年間発電量を計算すると、Si 単結晶 (Axitec 450W) は面積約 2.224 m²/枚、変換効率 20.2%、公称出力 450W である。屋根には約 24 枚が搭載可能で、シートの式に代入すると年間発電量は約 17 MWh となる。Si 多結晶 (Looop 275W) は 1.627 m²/枚、効率 16.8%、公称出力 275W で、同条件で 33 枚搭載でき、年間発電量は約 14 MWh。CIS (Solar Frontier 165W) は 1.228 m²/枚、効率 13.4%、出力 165W で、最大 44 枚搭載しても約 11 MWh にとどまる。これらの違いは、面積あたりの出力効率と、パネル 1 枚あたりの受光面積に比例して、搭載枚数 (N) を通じて発電量に直接影響することをシミュレーションが明確に示している。特に Si 単結晶パネルは、同じ面積で最も多くの出力を稼げるため、シミュレーションの計算上でも最も大きな発電量を示す。一方で、CIS の変換効率は低いが、太陽光パネルの出力

が温度変化によってどの程度変化するかを示す指標である温度係数が $-0.24\%/K$ と小さく、夏場の高温時でも出力低下が少ないとから、実効性能では安定しており、特に部分影や曇天の影響を受けやすい環境では有利になる。また多結晶は初期コストが低く、コストパフォーマンス面で有利だが、設置面積あたりの発電量では単結晶に劣る。以上を踏まえると、スプレッドシートに示されたパラメータをもとに最も性能面で優れているのは Si 単結晶パネルであり、特に屋根面積が限られる住宅や事業所においては、年間発電量の最大化に最も貢献する選択肢である。用途や設置条件によっては、多結晶や CIS の特徴を活かすことも検討すべきだが、性能重視であれば単結晶が最適解となる。

8.2 図 15 について、縦軸が電圧で横軸が電流であるため、電流の値が上がるほど電圧の値は下がる傾向にあることがわかる。また、一定の電流値までは緩やかに電圧が変化していったが、それを超えると急激に電圧が下がることも確認できる。太陽電池の I-V 特性は、光で生まれる電流源とダイオードに加えて、直列抵抗 R_s と並列抵抗 R_{sh} が入った回路で考えられる。まず電圧をマイナスにするとダイオードの電流はほぼ流れず、ほとんど光電流 I_{ph} だけが流れるので、グラフはほぼ横一直線になり、これが短絡電流 I_{sc} になる。ただし R_{sh} が完全ではないので、電圧を大きくマイナスにするほど少しづつ電流が減ってグラフはゆるく下がる。電圧をゼロよりプラス側に動かしていくと、ダイオードの指数関数の電流がだんだん増えて I_{ph} と打ち消し合い、やがて電流がゼロになる電圧 V_{oc} に達する。この V_{oc} は光の強さや温度で変わり、光が強いほど上がり、温度が高いほど下がる。さらに電圧を V_{oc} より大きくすると、ダイオードが順方向に強く流れるので電流は急にマイナス側（セルに流れ込む向き）へ増え、グラフは急降下する。ここでは R_s があるため、本当の指数曲線より少し丸くなる。逆に電圧をものすごくマイナスにしても、ブレークダウンが起こらなければ電流は I_{ph} 付近でほぼ一定のままだが、 R_{sh} のせいで完全に水平にはならない。まとめると、太陽電池のグラフはダイオードの指数的な動きと二つの抵抗の影響で形が決まり、この簡単な回路と式で大体の形を説明できる。

9. 感想

今回の実験「太陽電池の電気特性測定」を通して、実験前・実験中・実験後の各段階で多くの学びが得られた。まず実験前のレポート作成では、太陽電池の動作原理や等価回路モデルを理解し、使用するセンサ (INA260, LM35DZ) やマイコンボード (Arduino UNO) に関するデータシートを基に、測定回路をノートに丁寧に描く作業を行った。この準備により、実験時の測定がスムーズに進む基礎が築かれた。実験時は、LED 電球や白熱電球を用いた太陽電池セルの照射実験を行い、負荷抵抗を段階的に変化させながら、電圧・電流・温度を 3 人で役割分担して測定した。中でも、温度が 48°C を超えた際には手動で冷却するなど、安全管理にも留意しながら作業を行った。また、LCD が暗く値が読みづらいというトラブルに対しては、Arduino の設定を調整して対応し、現場での柔軟な判断力を養うことができた。さらに、取得したデータをもとに Excel で I-V 特性と P-V 特性をリアルタイムで描画し、最大出力点を明確に把握することで、以降の測定の最適な負荷抵抗値 (16.5Ω) を選定する判断にも役立てた。実験後のレポート作成では、MATLAB Online を用いたシミュレーションと比較しながら、取得データの信頼性や温度の影響について多角的に考察した。特に、LED 電球と白熱電球の比較を通して、発熱量の違いが太陽電池の出力に与える影響を定量的に評価し、高温環境下での太陽電池使用の課題についても理解を深めることができた。加えて、傾斜角を変化させて発電量の変化を測定し、発電効率が 90° に近づくほど上昇する傾向にあることを確認した上で、年間発電量の見積もりにも発展させることができた。総じて、この実験を通じて、事前準備の重要性、測定精度の確保、チームワークによる効率化、そして実験結果の科学的な分析と表現の技術が身についた。次回に向けては、自動ロギングの導入や照度の統一、さらに温度制御の工夫など、さらなる改善点も見えてきた。このような一連の流れを通して、単なる作業に終始するのではなく、「考える実験」を行うことの意義を強く実感した。

参考文献

- [1] 「【図解】太陽光発電の仕組みをわかりやすく解説！発電から売電まで」, <https://evdays.tepco.co.jp/entry/2022/02/01/kurashi1>, 2024 年 05 月 28 日公開.
- [2] 「太陽電池の分類」, 産総研, https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/about_pv/types/groups2.html, 2025 年 05 月 11 日参照.
- [3] 菅谷 武芳, 「III-V 族化合物半導体太陽電池の現状と低コスト化による将来展望」, 応用物理学会, <https://www.jsap.or.jp/columns/gx/e1-3#:~:text=GaAs%E5%A4%AA%E9%99%BD%E9%9B%BB%E6%B1%A0%E3%81%AE%E5%A4%89%E6%8F%9B,%E6%9C%80%E3%82%82%E9%AB%98%E3%81%84%E5%A4%89%E6%8F%9B%E5%8A%B9%E7%8E%87%E3%81%A7%E3%81%99%EF%BC%8E>, 2025 年 05 月 11 日参照.
- [4] 「有機系太陽電池」, 産総研, https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/about_pv/types/Organic2.html, 2025 年 05 月 11 日参照.
- [5] Jason Svarc, 「Most efficient solar panels 2025」, https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels?utm_source=chatgpt.com, 2025 年 03 月 20 日公開.
- [6] ぬこ, 「太陽電池の等価回路モデルと I-V 特性」, <https://www.nukolab.com/Equivalent-circuit-model-of-pv/>, 2023 年 12 月 10 日更新.
- [7] 「LED の発光原理と白色 LED の仕組み」, Panasonic, <https://www2.panasonic.biz/jp/lighting/led/basics/principle.html>, 2025 年 5 月 19 日参照.
- [8] 「白熱灯と蛍光灯」, https://global.canon/ja/technology/s_labolight/002/02.html, Canon, 2025 年 5 月 19 日参照.
- [9] 「LED の変換効率」, <https://www.otsuka-shokai.co.jp/products/led/knowledge/conversion-efficiency.html>, 大塚商会, 2025 年 5 月 19 日参照.
- [10] 「Here is how you can calculate the annual solar energy output of a photovoltaic system」, <https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/here-is-how-you-can-calculate-the-annual-solar-energy-output-of-a-photovoltaic-system>, 2025 年 05 月 24 日参照.
- [11] 「NEDO 日射量データベース閲覧システム」, <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/colormap.html>, NEDO, 2025 年 05 月 24 日参照.
- [12] <https://www.solar-off.com/shopbrand/solarpanel>, SOLAR-OFF, 2025 年 05 月 24 日参照.