

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

2 ダイオードの特性

実験日 令和 4 年 6 月 2 日 (木)
令和 4 年 6 月 9 日 (木)

班	学生番号	氏名
1	3326	塚原秀翔

共同実験者名

3301 青木柊人 3305 市川潤

3309 大山主朗 3317 杉山滉太

提出日			備考	評価
予定日	6/16	6/23		
提出日				

1 目的

今回の実験では以下の2点を目的とする。

- ダイオードの原理を知り、実験により整流作用を理解することでダイオードを使用できるようにする。
- ツェナーダイオードの特性を学び、ツェナーダイオードを使用できるようにする。
- 太陽電池の特性を知り、使用できるようにする。

2 原理

2.1 ダイオード

半導体内部には、電子と正孔がキャリアとして存在している。真性半導体には4価のシリコンがよく使われる。真性半導体に微量の不純物を混入させたものを不純物半導体と言い、不純物としてリンやヒ素のような5価の元素(ドナー)を用いたものをn型半導体、ホウ素やガリウムのような3価の元素(アクセプタ)を用いたものをp型半導体と呼ぶ。

図1のように、p型半導体とn型半導体を接合し、端子を付けたものをダイオードと呼ぶ。ダイオード内部において、正孔はp型半導体内では多数キャリア、n型半導体内では少数キャリアであるから、より密度の大きいp型領域からn型領域へ流れ込む。この現象を拡散と呼ぶ。また、n領域へ拡散した正孔はn領域内の電子と結合し、双方とも消滅する。したがって、n領域では正に帯電したドナーイオンが、p領域では負に帯電したアクセプタイオンのみが残る、平衡状態となる。この結果、pn接合近傍にはキャリアの存在しない空乏層が形成される。空乏層では、電化分布によりp領域側からn領域側へ電位差が発生しこれを拡散電位と呼ぶ。

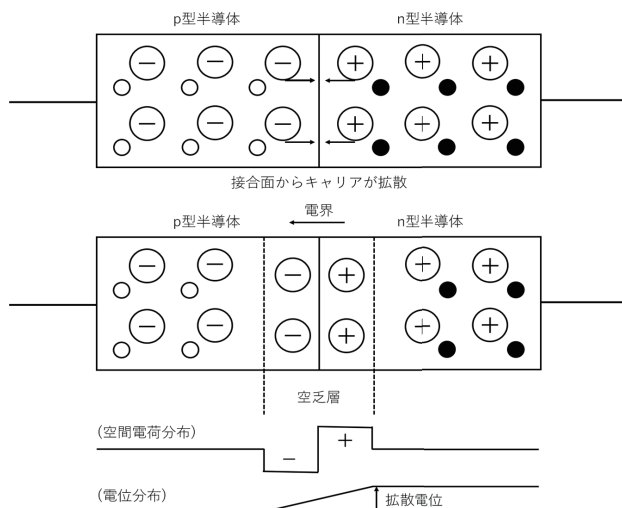


図 1: pn 接合と空乏層

図2のようにp型半導体に正、n型半導体に負の電圧を加えると、p領域とn領域の電位差は拡散電圧+印加電圧となり、電圧差が減少するため拡散電位により阻止されていたキャリアの拡散が起こる。このとき、ダイオードに印加した電圧、流れた電流を、それぞれ順方向電圧、順方向電流という。逆に、n型半導体に正、p型半導体に負の電圧を加えると、p領域とn領域の電圧差が大きくなるため電流は殆ど流れなくなる。このとき、ダイオードに加えた電圧、流れた電流を、それぞれ逆方向電圧、逆方向電流という。また、この電圧のかけ方を逆バイアスという。

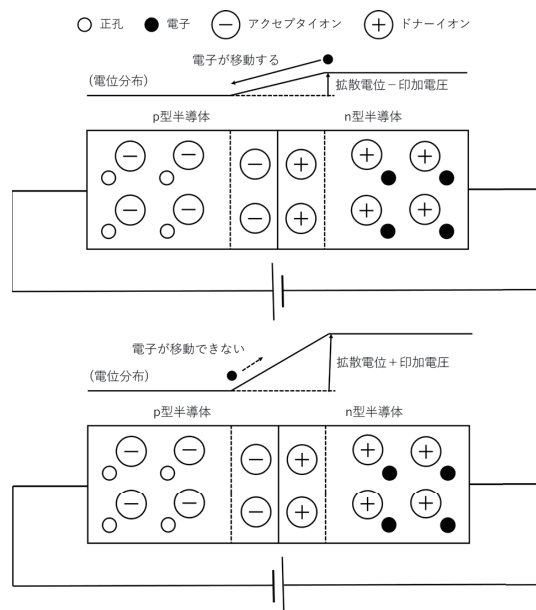


図 2: ダイオードの動作原理

2.2 ツェナーダイオード

ツェナーダイオードは定電圧ダイオードとも呼ばれ、加わる電圧がある一定の値 (ツェナー電圧) を上回ると、急激に電流が流れるようになる素子である。このとき流れる電流をツェナー電流と呼ぶ。入力電圧の増加に伴いツェナー電流が増加するため、出力電圧は一定に保たれる。すなわち、ツェナーダイオードは端子間電圧がツェナー電圧以上なら ON、ツェナー電圧以下なら OFF といったようにスイッチと似たような動作をして、ほぼ一定の電圧を維持する素子である。

2.3 太陽電池

太陽電池は様々な種類のものがあるが、本実験では最も基本的な構造である結晶シリコン太陽電池を用いる。結晶シリコン太陽電池の構造は、図 3 のような上段が n 形半導体、下段が p 形半導体となっており、pn 結合している。図 4 で示すように、光が照射されると光のエネルギーにより接合面の電子は n 形半導体へ、正孔は p 形半導体へ移動し、起電力が発生する (光起電力効果)。この起電力は、光が照射されている間は持続し外部に負荷を接続しておけば電力を供給することができる。また、電子は負荷を通過して p 形半導体に戻り、正孔と結合する。

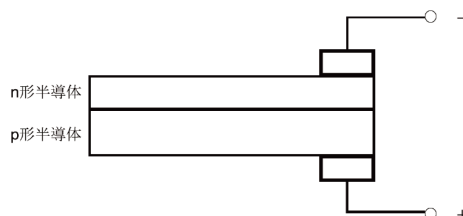


図 3: 結晶シリコン太陽電池の構造

太陽電池の電流-電圧特性は図 5 に示したようなダイオードの特性を下にシフトした特性となる。ここで電流値は負の値になるが、正に消費と考えていたので負の値は発電していることを意味する。一般的には、発電した電力も正の値で表現するので、縦軸を反転させる (図 5 参照)。また、太陽電池の電

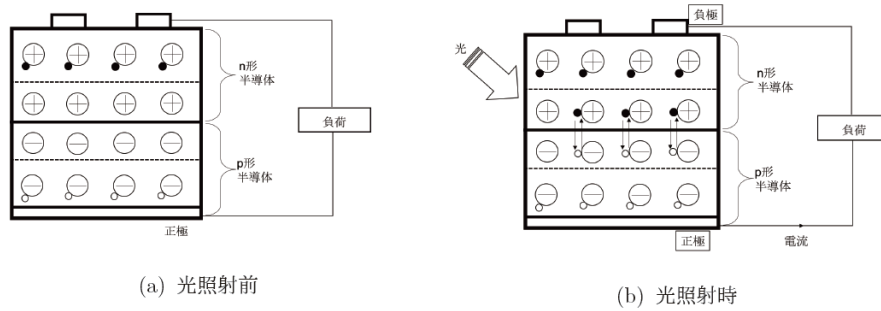


図 4: 太陽電池の動作原理

流-電圧特性を I-V カーブ、電力-電圧特性を P-V カーブと呼ぶ。図 6 に示すように、I-V カーブは第 1 象限のみを表示する。

ここで電圧が 0 V になる《短絡する》時の電流を短絡電流 (I_{sc})、電流が 0 A になる電圧を解放電圧 (V_{oc}) と呼ぶ。また、縦軸を電力とした図 6 に示す P-V カーブからわかる通り、太陽電池はどのような電圧で利用しても同じ電力を得られるわけではない。太陽電池を有効に活用するためには、発電電力が最大になる最大電力点で利用する必要がある。

ここで、発電電力が最大になる電力を最大電力 (P_{max})、その時の電圧を最適動作電圧 (V_{pm}) と呼ぶ。 P_{max} は、気象条件によって大きく変化し V_{pm} も変化してしまう。そのため、太陽電池を利用したシステム（太陽光発電システム）では、常に P_{max} を追従する制御である MPPT 制御（Maximum Power Point Tracking：最大電力点追尾）が具備されている。MPPT には様々な手法があるが、その手法を考える上でも太陽電池の I-V カーブの測定は非常に重要である。

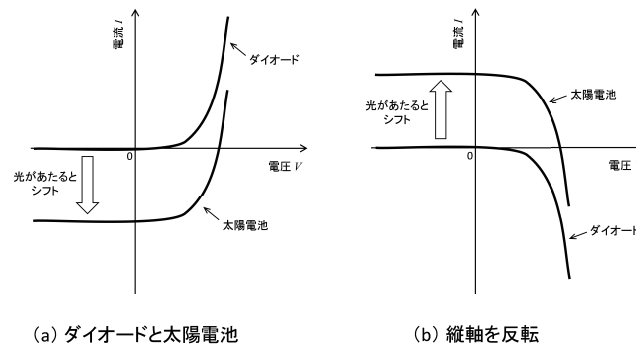


図 5: ダイオードと太陽電池の電流-電圧特性

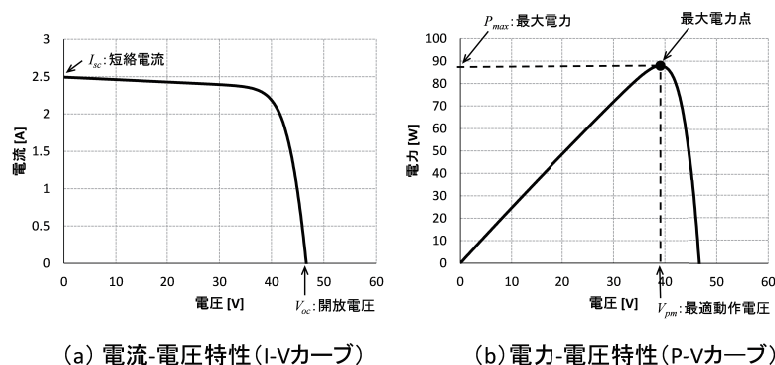


図 6: 太陽電池の発電特性（左：I-V カーブ、右：P-V カーブ）

3 実験手順

3.1 ダイオードの特性実験

3.1.1 実験器具

この実験で使用した器具を以下の表に示す。

表 1: 実験器具

使用器具	製造元	型番	シリアルナンバー
直流電源	YOKOGAWA	PA1811	L96-000668
直流電流計 (ミリアンペア)	YOKOGAWA	YES 1990	70 BA0 1812
直流電圧計	YOKOGAWA	YAS 1991	71 BA0 3371

3.1.2 実験方法

- 図 7 のように回路を作成した。ここで抵抗 R は 10Ω 、ダイオード D は 1N4002 を用いた。
- 順バイアス E を印加し、電圧 V_D が $0\sim 0.8V$ 間で $0.1V$ ずつ変化させた時の電流 I_D を計測した。
- 計測値から $V_D - I_D$ 特性をグラフに描いた。
- ダイオード D を逆向きに接続し (ii)、(iii) を繰り返した。

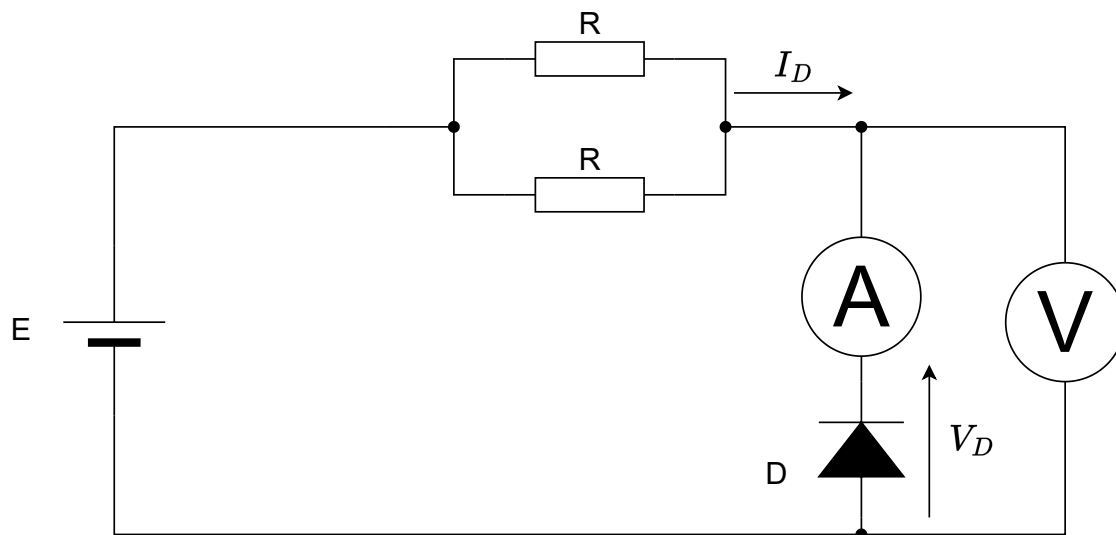


図 7: 順バイアス測定回路

3.1.3 結果

表 2 は測定結果を表したものである。また、図 8、9 は、順バイアス、逆バイアスの電流電圧特性を表している。これらから順バイアスの場合は $0.6V$ 以上で電流が流れるが逆の場合は一切流れないことが分かる。

表 2: ダイオード特性の測定結果

電圧 (順バイアス) V_D [V]	電流 I_D [mA]	電圧 (逆バイアス) V_D [V]	電流 I_D [mA]
0.000	0.0	0	0
0.100	0.0	1	0
0.200	0.0	2	0
0.300	0.0	3	0
0.400	0.0	4	0
0.500	1.0	5	0
0.600	2.0	6	0
0.625	4.0	7	0
0.650	6.0	8	0
0.675	10.0	-	-
0.700	19.8	-	-
0.725	29.0	-	-
0.750	48.0	-	-
0.775	71.0	-	-
0.800	116	-	-

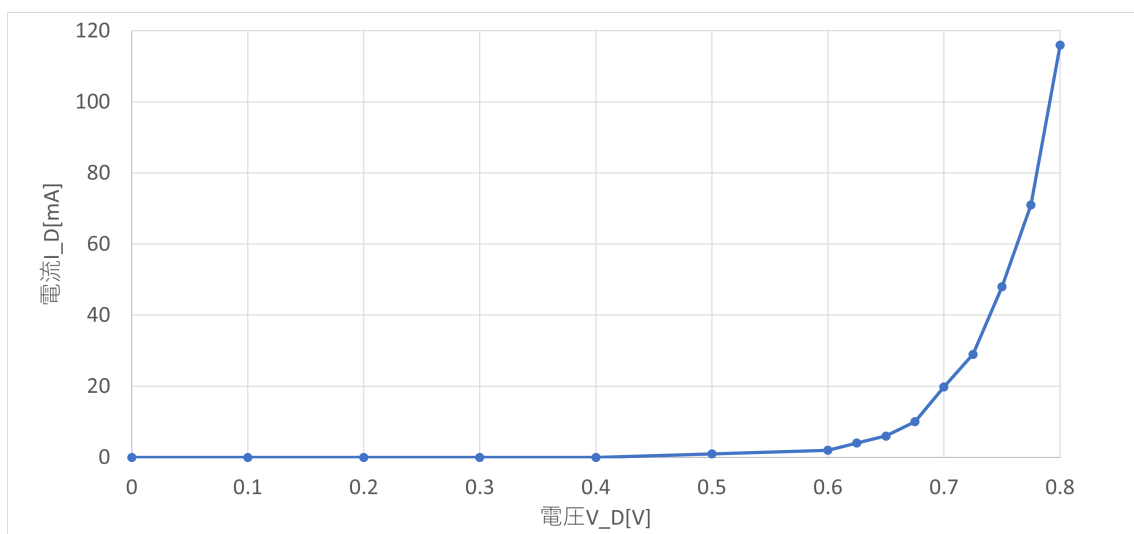


図 8: 順バイアスの電流電圧特性

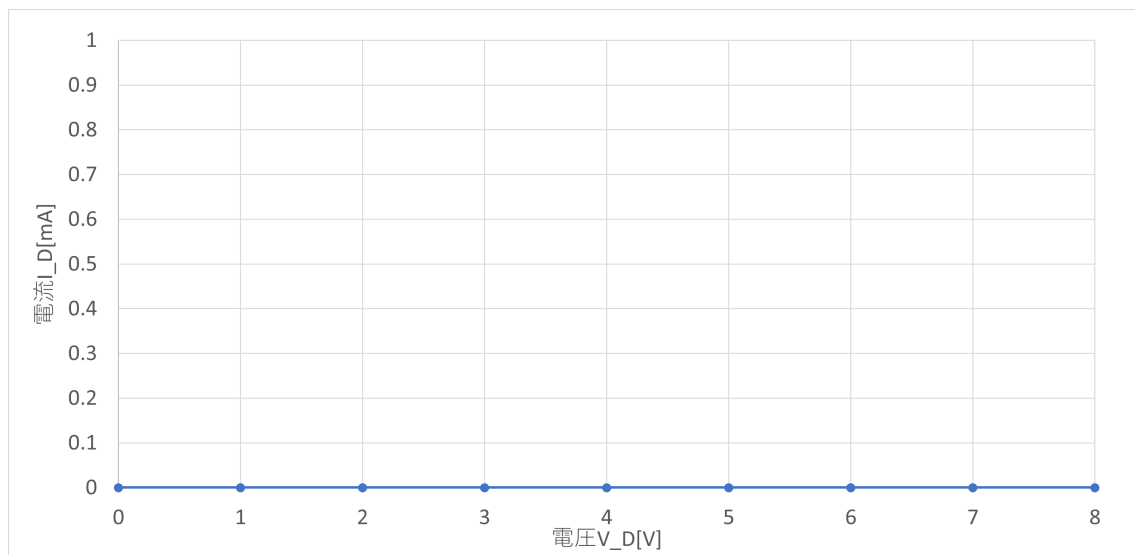


図 9: 逆バイアスの電流電圧特性

3.1.4 考察

- (i) 直流電圧電流特性グラフを説明せよ。(立ち上がり電圧 V_J をグラフに書き込む。また、 $E=0.8V$ としたときの負荷線を描き、動作点 P の微分抵抗 $r_d = \Delta V_D / \Delta I_D$ を求めよ、 r_d 、 V_J 、理想ダイオードからなる等価回路を描き、どの部分がどのような特性を表しているのか説明せよ。)

図 10 は図 9 に負荷線と立ち上がり電圧を追加したものである。黒点が立ち上がり電圧である。負荷線は $E=0.8V$ とし、以下の式 1 を用いて求めた。[1]

$$\begin{aligned} I_D &= -\frac{1}{R}V_D + \frac{E}{R} \\ &= -200V_D + 160 \text{ [mA]} \end{aligned} \quad (1)$$

動作点 P の微分抵抗 r_d は 0.7、0.725V を用いて以下のように求めた。

$$\begin{aligned} r_d &= \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \\ &= \frac{0.725 - 0.7}{(29 - 19.8) \times 10^{-3}} \\ &= 2.72 \text{ } [\Omega] \end{aligned} \quad (2)$$

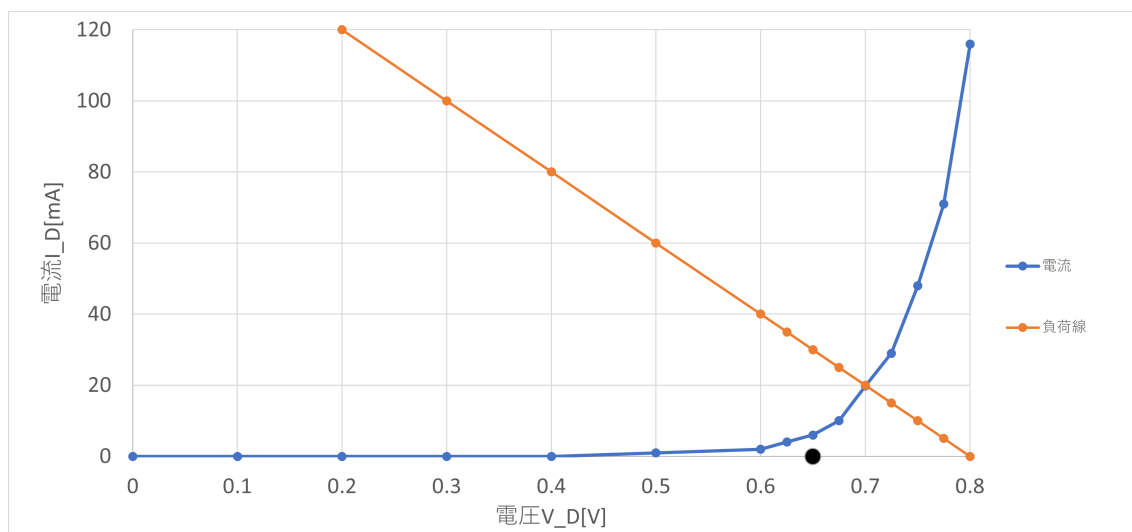


図 10: 順バイアスの負荷線及び立ち上がり電圧

図 11 は r_d 、 V_J 、理想ダイオードからなる等価回路を表したものである。 V_J は逆方向の電圧を加えることで立ち上がり電圧が 0V より大きくなることを表している。 r_d は垂直ではなく緩やかに電流が上がっていくことを表している。

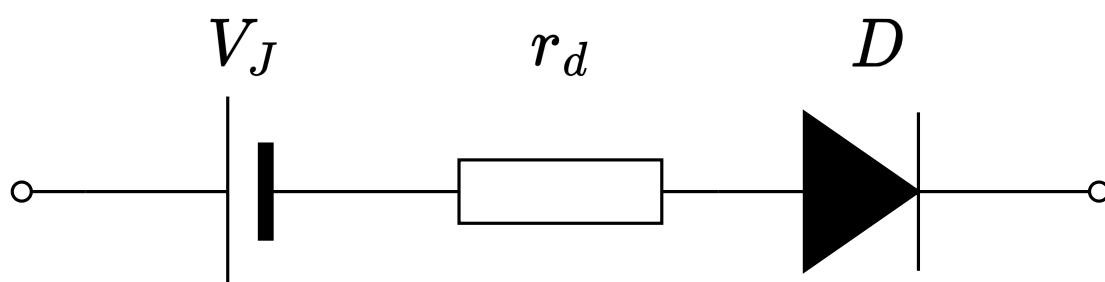


図 11: r_d 、 V_J 、理想ダイオードからなる等価回路

- (ii) 実験で用いたダイオードのデータシートから逆方向電流の値を調べよ。また、逆バイアスの場合でもわずかに電流が流れる理由を図を用いて説明せよ。(多数キャリアや少数キャリアという観点から考えること。図2を用いるとよい。)

データシート [2] より逆電流が 25°C のとき最大 $10\mu\text{A}$ 流れることが分かる。図2より p 型には多数キャリアしか図示されていないため電流が流れないように見えるが実際は少数キャリアである電子が移動するドリフトが起きるため少しの電流が流れてしまう。

3.2 ツェナーダイオードの特性実験

3.2.1 実験器具

この実験で使用した器具を以下の表に示す。

表 3: 実験器具

使用器具	製造元	型番	シリアルナンバー
直流電源	YOKOGAWA	PA1811	L96-000668
直流電流計 (ミリアンペア)	YOKOGAWA	YES 1990	70 BA0 1812
直流電圧計	YOKOGAWA	YAS 1991	71 BA0 3371

3.2.2 実験方法

- (i) 図 12 のように回路を作成した。ここで抵抗 R は 300Ω 、抵抗 R_L は $1.0\text{k}\Omega$ 、ダイオード ZD は 1N4736A を用いた。
- (ii) 電源電圧 V_i を $0\sim 18\text{V}$ まで 1.0V 刻みで増加させ、電流 I_Z 、電圧 V_L を計測した。
- (iii) 計測値から $V_i - V_L$ 特性、 $V_i - I_Z$ 特性を同一グラフ上に描いた。

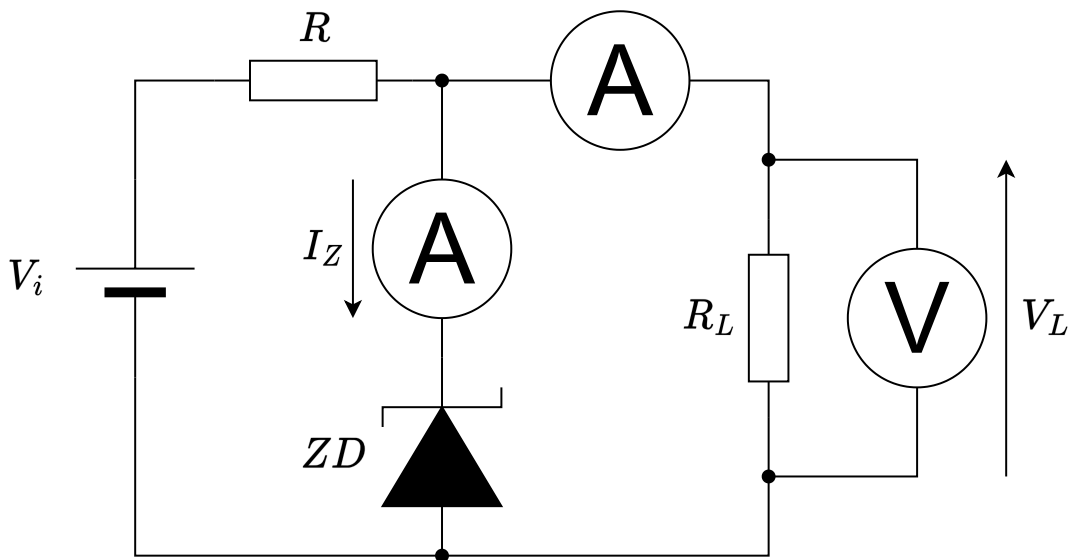


図 12: ツェナーダイオード特性の測定回路

3.2.3 結果

表 4 は測定結果を表したものである。この表から、入力電圧が 8V を超えるとツェナー電流が流れ始めることがわかる。図 13 は $V_i - V_L$ 特性、 $V_i - I_Z$ 特性のグラフである。このグラフから、出力電圧が最大になるとツェナー電流が流れ始めることが分かる。

表 4: ツェナーダイオード特性の測定結果

入力電圧 V_i [V]	出力電圧 V_L [V]	ツェナー電流 I_Z [mA]
0	0	0
1	0.8	0
2	1.5	0
3	2.3	0
4	3	0
5	3.8	0
6	4.6	0
7	5.3	0
8	6.1	0
9	6.8	0.1
10	6.9	3
11	6.9	6.2
12	7	9.6
13	7	12.8
14	7	16.1
15	7	19.4
16	7.1	22.6
17	7.1	25.9
18	7.2	29.2

3.2.4 考察

- (i) 今回用いたツェナーダイオード 1N4736A をダイオード規格表 (または、データシート) でツェナー電圧を調べ、実験結果と比較して考察せよ。
データシート [3] よりツェナー電圧は 6.8V で実験では 6.8~7.2V で推移しているので差異がほぼないので実験は成功しているといえる。
- (ii) ツェナーダイオードはどういった場合に用いられるか説明せよ。
ツェナーダイオードには電流が変化しても電圧が一定であるという特性があるため定電圧回路に用いられる。
- (iii) $V_L - I_Z$ 特性のグラフを描き、ツェナー電圧 V_Z を明記せよ。
図 14 はツェナーダイオードの $V_Z - I_Z$ 特性を表したものである。また、オレンジの点は立ち上がり電圧 V_Z を表している。
- (iv) 各グラフから入出力特性を考察せよ。入力特性は図 13 より入力電圧が一定値を超えると出力電圧が一定になることが分かる。
出力特性は図 14 より一定電圧以上をかけることにより急激に電流が流れることが分かる。

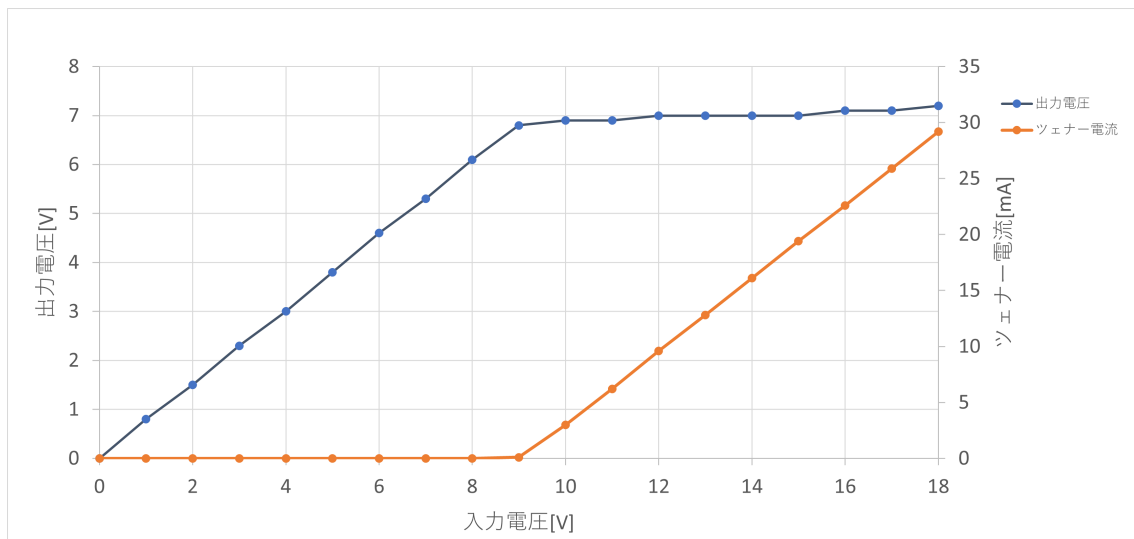


図 13: ツェナーダイオード特性

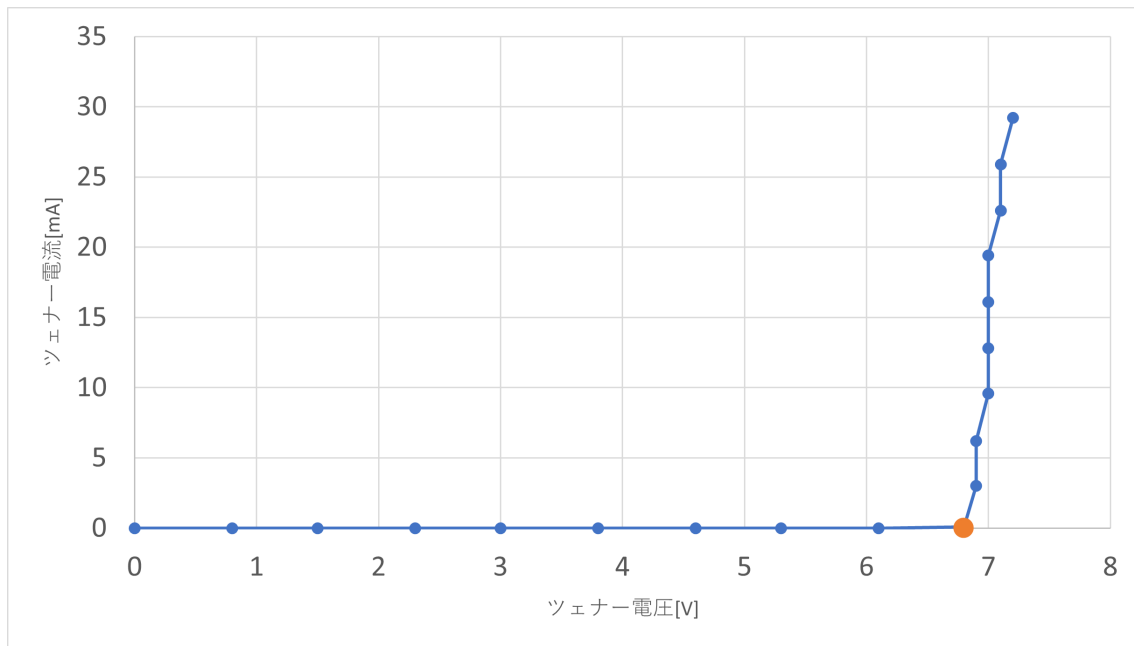


図 14: ツェナーダイオードの $V_L - I_Z$ 特性

3.3 ツェナーダイオード定電圧回路の実験

3.3.1 実験器具

この実験で使用した器具を以下の表に示す。

表 5: 実験器具

使用器具	製造元	型番	シリアルナンバー
直流電源	YOKOGAWA	PA1811	L96-000668
直流電流計 (ミリアンペア)	YOKOGAWA	YES 1990	70 BA0 1812
直流電圧計	YOKOGAWA	YAS 1991	71 BA0 3371

3.3.2 実験方法

- 図 15 のように回路を作成した。ここで抵抗 R は 300Ω 、抵抗 R_L は可変、ダイオード ZD は 1N4736A を用いた。
- 電源電圧 V_i を 15V に固定し可変抵抗を変化させツェナー電流 I_Z を 2mA 刻みで 2~22 まで変化させ出力電圧 V_L 、出力電流 I_L を計測した。
- 計測値から $V_L - I_Z$ 、 $I_L - I_Z$ をグラフに描いた。

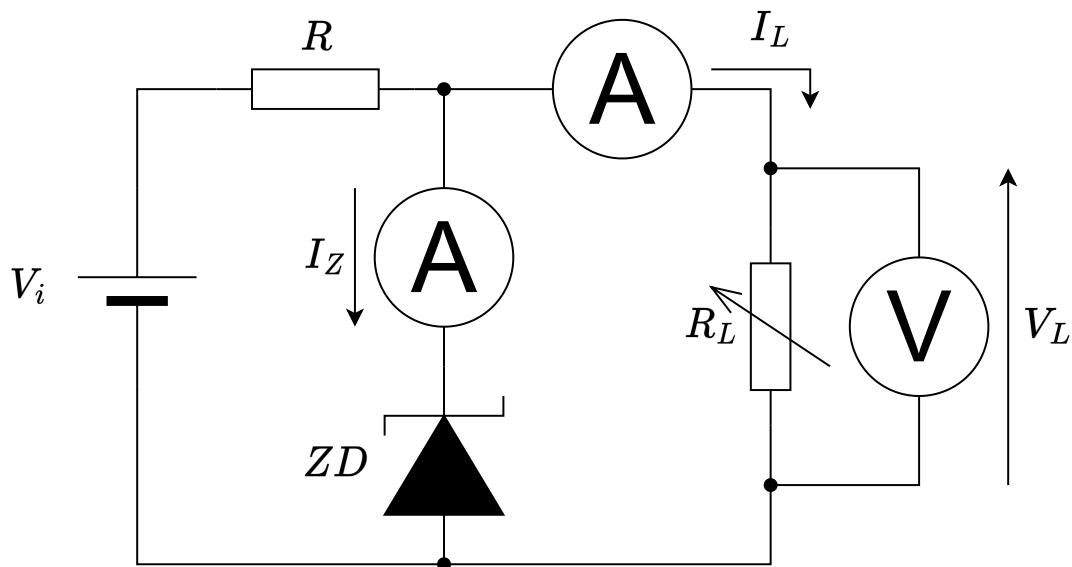


図 15: 定電圧特性の測定回路

3.3.3 結果

表 6 は測定結果を表したものである。また、図 16 は定電圧回路の $I_Z - V_Z$ 特性を、図 17 は定電圧回路の $I_Z - I_L$ 特性を表したものである。これらから出力電圧はツェナー電流に依存せず、出力電流はツェナー電流が増加すると減少していくことが分かる。

表 6: ツェナーダイオード定電圧回路の測定結果

ツェナー電流 [mA]	出力電圧 [V]	出力電流 [mA]
2.0	6.9	25.0
4.0	6.9	23.0
6.0	6.9	21.0
8.0	6.9	18.8
10	7.0	16.7
12	7.0	14.7
14	7.0	12.6
16	7.1	10.5
18	7.1	8.4
20	7.1	6.3
22	7.1	4.2

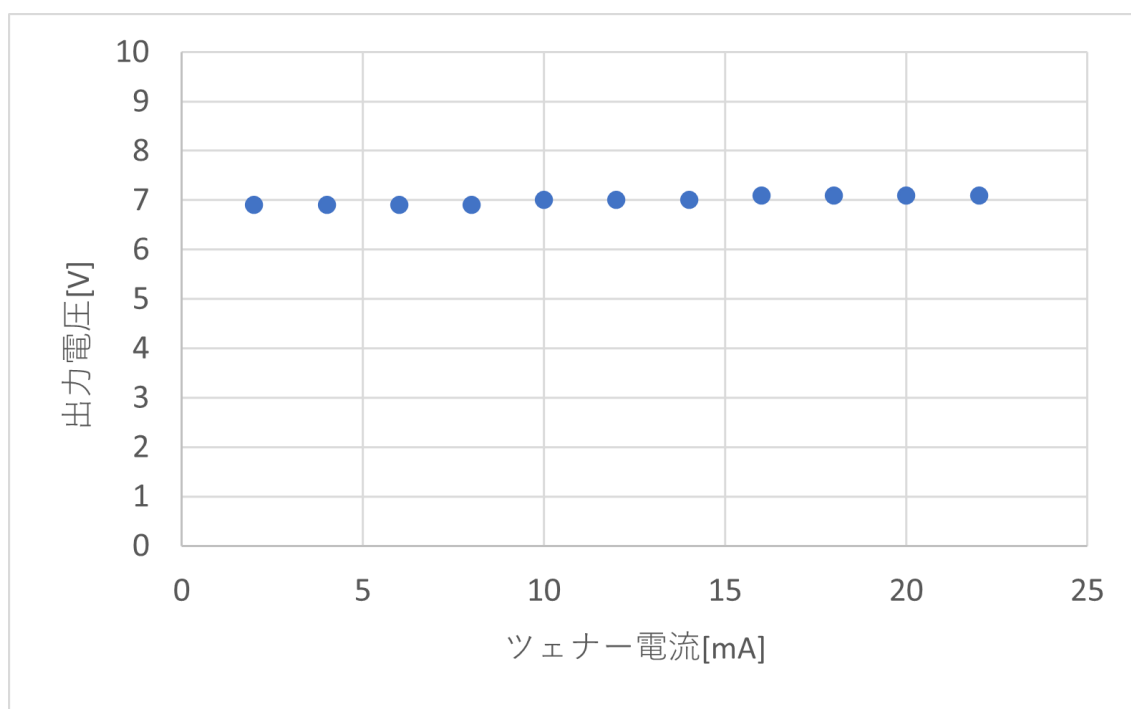


図 16: 定電圧回路の $I_Z - V_Z$ 特性

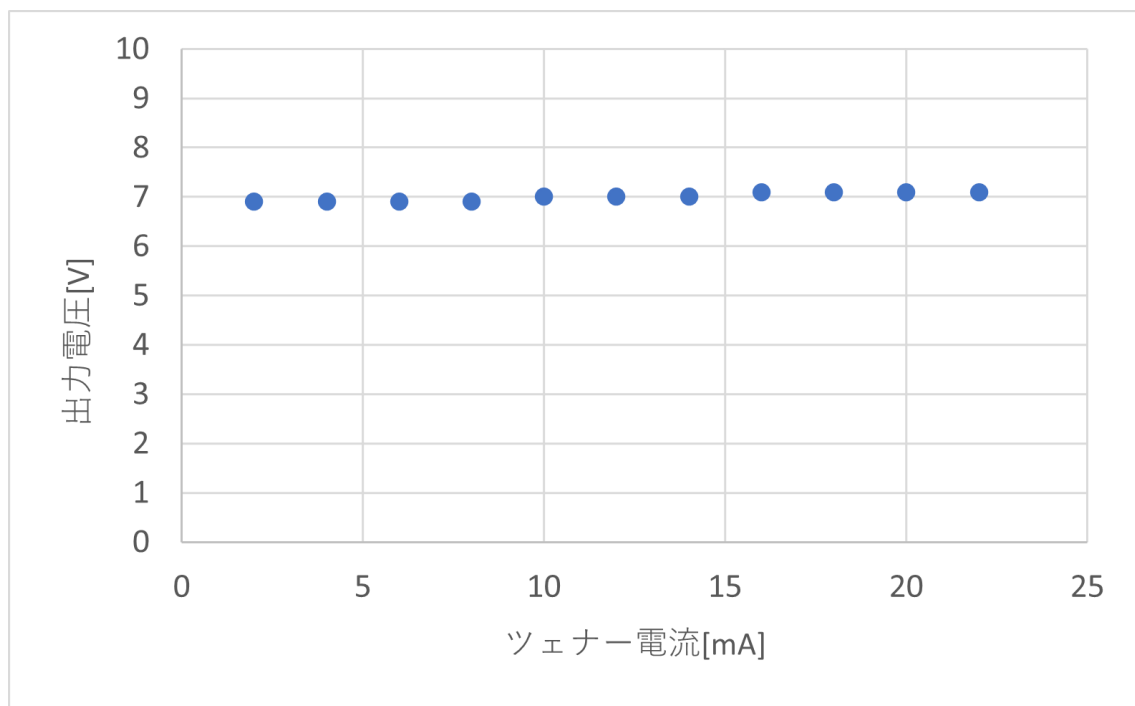


図 17: 定電圧回路の $I_Z - I_L$ 特性

3.3.4 考察

- (i) 等価回路図 (図 18) を参考にして、測定結果から R_L 、 R_Z 、およびこれらの合成抵抗 R_A を算出せよ。

図 18 より R_L 、 R_Z 、および合成抵抗 R_A はオーム則、和分の積を用いて以下の式で求められる。[1]

$$R_L = \frac{V_L}{I_L} \quad (3)$$

$$R_Z = \frac{V_Z}{I_Z} \quad (4)$$

$$R_A = \frac{R_L R_Z}{R_L + R_Z} \quad (5)$$

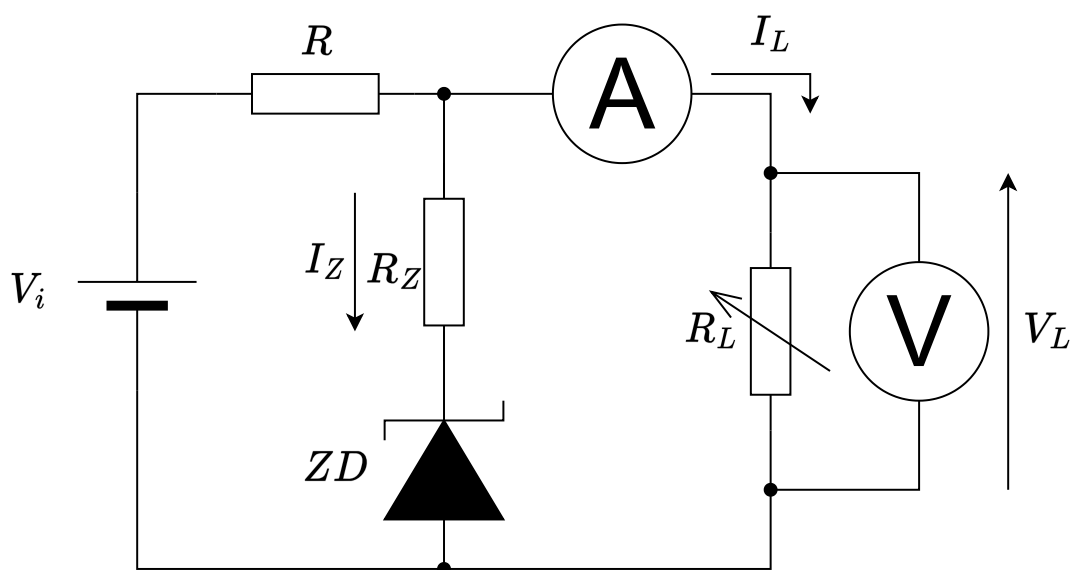


図 18: 定電圧回路の等価回路

これらの計算の算出結果を表 7 に示す。

- (ii) $I_Z - R_L$ 特性、 $I_Z - R_Z$ 特性を同一グラフに重ねて描き、考察せよ。ここで、何について論じたかを明確にした上で記述すること。

図 19 は R_L 、 R_Z 、 R_A のツェナー電流特性を表したものである。式 4 よりツェナー電流を増加させていったときグラフは反比例であることが分かる。また I_L は I_Z が増加していくと減少していくので式 3 より反比例のグラフを左右反転させたようなグラフが線画されるはずである。また R_A は以下の式でも求められる。

$$R_A = \frac{V_L}{\frac{V_i}{R}} \quad (6)$$

この式から V_L 、 V_i 、 R は一定なので R_A が一定であることが分かる。つまりグラフは一直線になることが分かる。以上は図 19 と一致する。

3.4 太陽電池の発電特性の実験

3.4.1 実験器具

この実験で使用した器具を以下の表に示す。

表 7: R_L 、 R_Z 、 R_A の算出した抵抗値

ツェナー電流 $I_Z[mA]$	可変抵抗値 $R_L[\Omega]$	ダイオード抵抗値 $R_Z[\Omega]$	合成抵抗 $R_A[\Omega]$
2	0.276	3.450	0.256
4	0.300	1.725	0.256
6	0.329	1.150	0.256
8	0.367	0.863	0.257
10	0.419	0.700	0.262
12	0.476	0.583	0.262
14	0.556	0.500	0.263
16	0.676	0.444	0.268
18	0.845	0.394	0.269
20	1.127	0.355	0.270
22	1.690	0.323	0.271

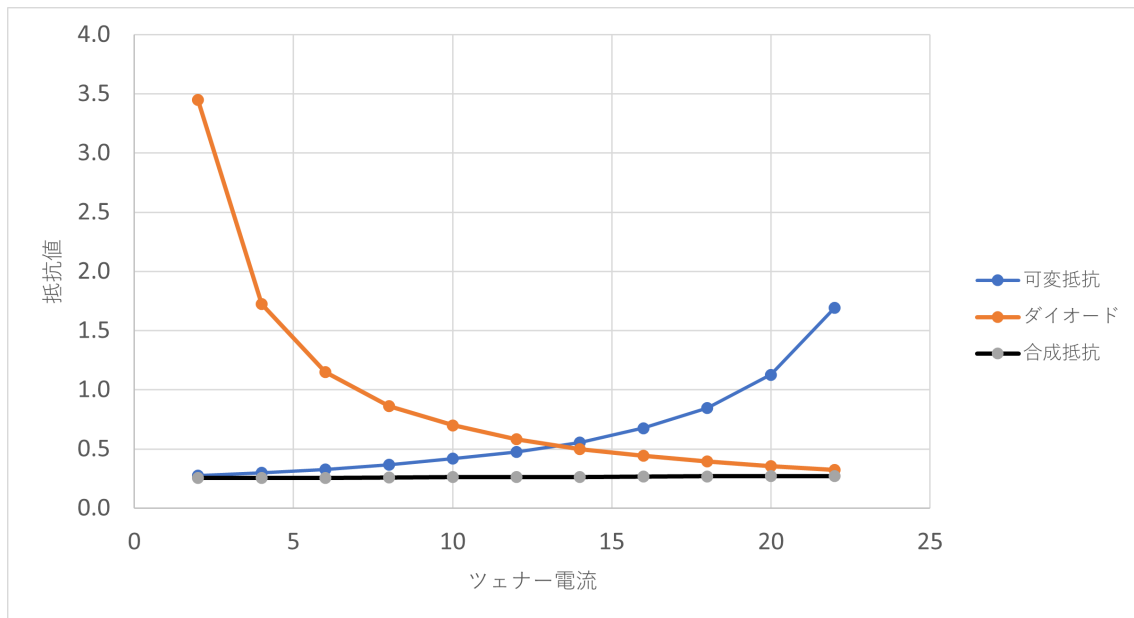


図 19: R_L 、 R_Z 、 R_A のツェナー電流特性

表 8: 実験器具

使用器具	製造元	型番	シリアルナンバー
デジタルマルチメーター (電流)	OWON	B35	B351318443
デジタルマルチメーター (電圧)	OWON	B35	351518203
扇風機	シーネット	CCM1018K	C16018205
照度計	DIGITAL LUX METER	LX-1010B	T428893
温度計	RoHT	TL-TK04	202019031
太陽光パネル	SUNYO	SY-M5W	-

3.4.2 実験方法

- (i) 図 21 のように回路を設計した。
- (ii) 太陽電池をライトの光が均等に当たるように配置した。
- (iii) ライトを一つ点灯させ、太陽電池の四隅、中央の計五か所の照度を計測し、その平均を代表値として算出した。
- (iv) 太陽電池の温度をライトや扇風機を用いて 30 度、誤差 ± 2 度 になるように調整した。
- (v) 可変抵抗 R_L を変更させながら、電流 I 、電圧 V を記録し V_{oc} 付近ではデータ取得間隔を細かくした。
- (vi) 測定結果を I - V グラフに描いた。
- (vii) 点灯させるライトを二つにし (v)、(vi) を繰り返す
- (viii) 温度を 50 度にし上記を繰り返した。

3.4.3 結果

図 21 は太陽電池の電流電圧特性を表したものである。また表 9、10、11、12 は計測結果を表したものである。これらからある一定以上の電圧になると大幅に電流値が小さくなることが分かる。

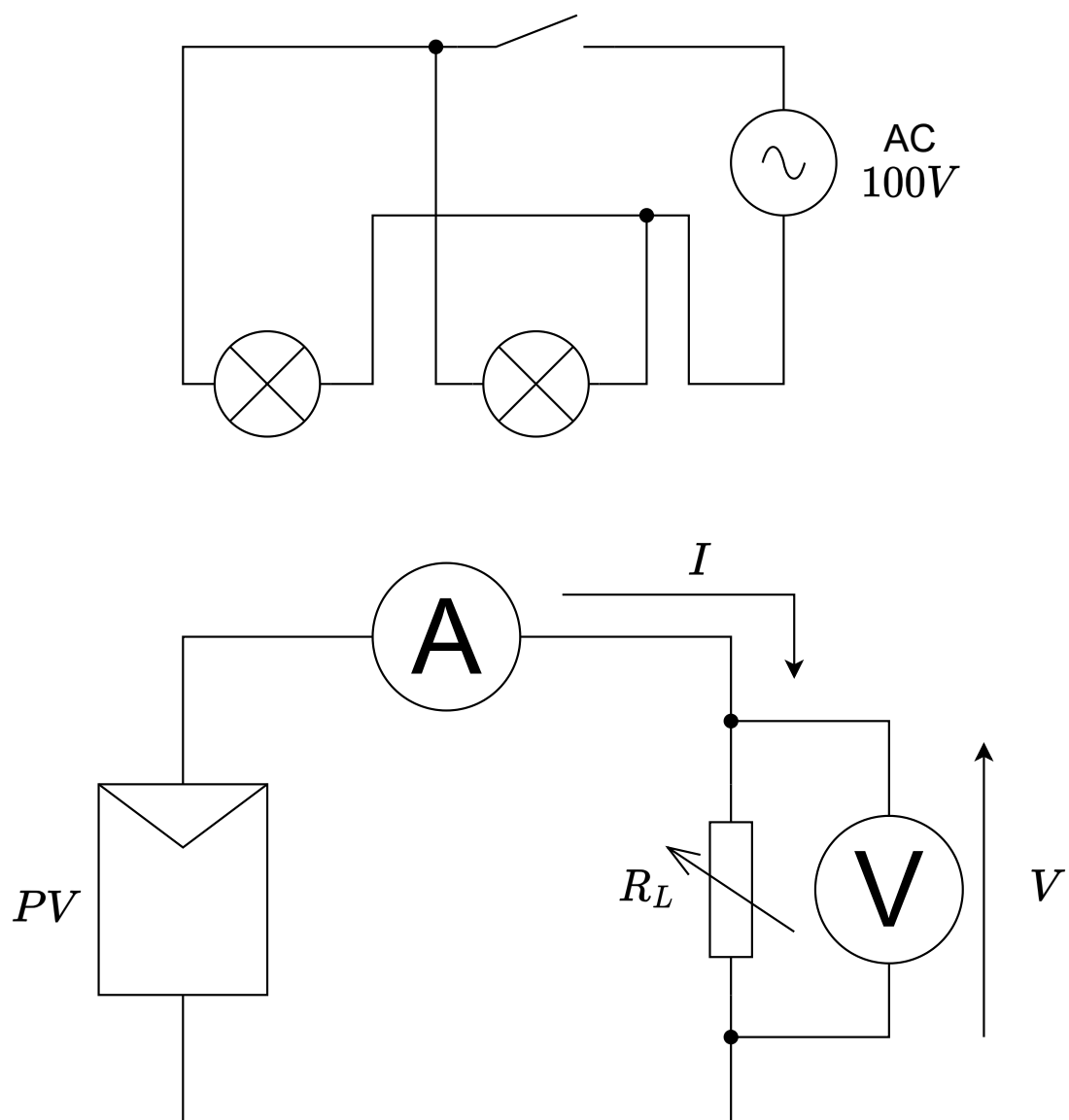


図 20: 太陽電池の発電特性の測定回路

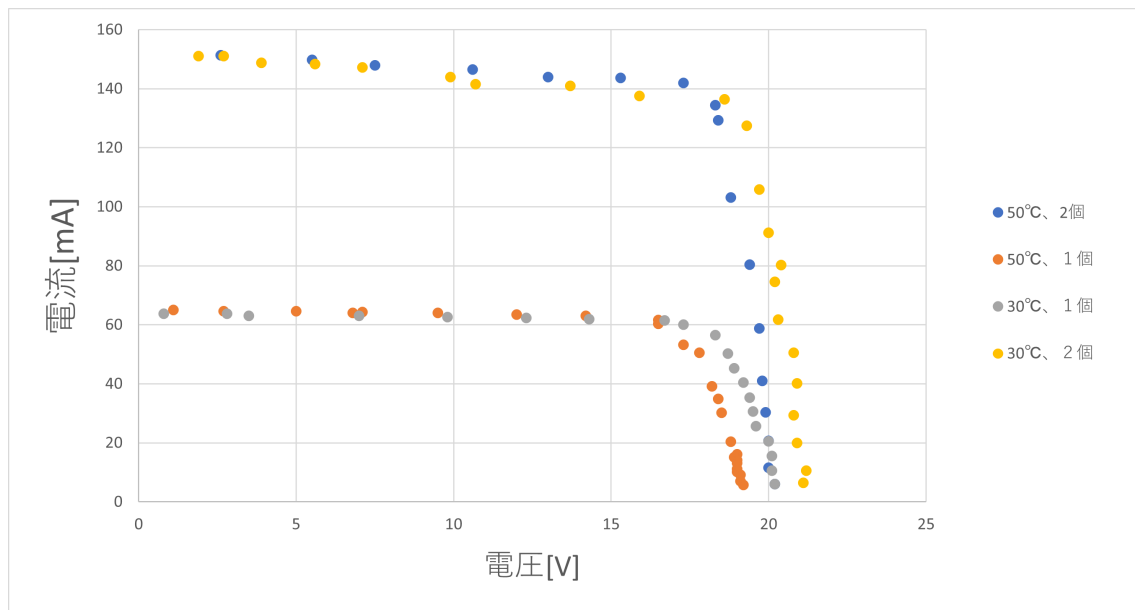


図 21: 太陽電池の電流電圧特性

表 9: 30 度ライト一個

電圧 [V]	電流 [mA]	電力 [W]
0.8	63.8	0.05
2.8	63.7	0.17
3.5	63	0.22
7.0	63.1	0.44
9.8	62.6	0.61
12.3	62.3	0.76
14.3	61.9	0.88
16.7	61.5	1.02
17.3	60.0	1.03
18.3	56.5	1.03
18.7	50.2	0.93
18.9	45.3	0.85
19.2	40.5	0.77
19.4	35.3	0.68
19.5	30.7	0.59
19.6	25.7	0.50
20.0	20.5	0.41
20.1	15.5	0.31
20.1	10.6	0.21
20.2	6.1	0.12

表 10: 50 度ライト一個

電圧 [V]	電流 [mA]	電力 [W]
1.1	65	0.07
2.7	64.6	0.17
5.0	64.6	0.32
6.8	64.1	0.44
7.1	64.3	0.46
9.5	64.0	0.61
12.0	63.5	0.76
14.2	63.1	0.90
16.5	61.6	1.02
16.5	60.3	0.99
17.3	53.3	0.92
17.8	50.5	0.90
18.2	39.1	0.71
18.4	34.9	0.64
18.5	30.2	0.56
18.8	20.4	0.38
19.0	16.1	0.31
18.9	15.1	0.29
19.0	14.1	0.27
19.0	13.1	0.25
19.0	11.1	0.21
19.0	10.2	0.19
19.1	9.1	0.17
19.1	7.1	0.14
19.2	5.8	0.11

表 11: 30 度ライト二個

電圧 [V]	電流 [mA]	電力 [W]
1.9	151.1	0.28
2.7	151.0	0.41
3.9	148.8	0.58
5.6	148.3	0.83
7.1	147.2	1.05
9.9	144.0	1.43
10.7	141.5	1.51
15.9	137.6	2.19
13.7	141.0	1.93
18.6	136.4	2.54
19.3	127.5	2.46
19.7	105.8	2.08
20.0	91.2	1.82
20.4	80.3	1.64
20.2	74.5	1.50
20.3	61.8	1.25
20.8	50.6	1.05
20.9	40.1	0.834
20.8	29.3	0.61
20.9	20.0	0.42
21.2	10.6	0.22
21.1	6.4	0.14

表 12: 50 度ライト二個

電圧 [V]	電流 [mA]	電力 [W]
2.6	151.4	0.39
5.5	149.8	0.82
7.5	147.9	1.11
10.6	146.5	1.55
13.0	144.0	1.87
15.3	143.7	2.20
17.3	142.0	2.46
18.3	134.4	2.46
18.4	129.3	2.38
18.8	103.1	1.94
19.4	80.4	1.56
19.7	58.8	1.16
19.8	41.0	0.81
19.9	30.4	0.60
20.0	20.7	0.41
20.0	11.6	0.23
20.2	6.1	0.12

3.4.4 考察

- (i) 各条件下の電流-電圧の測定結果から電力を算出し、V-P カーブを描きなさい。また、最大電力点を抽出して表にまとめ、条件の変化と最大電力点について考察せよ。

図 22 は太陽電池の電圧電力特性を示したものである。また表 13 は 4 条件での最大電力値を表している。これらからライトの数の増加、または温度が下がると電力は増加することが分かる。光エネルギーを吸収しその変換過程で熱や蒸気、運動エネルギーなどの変換を必要とせず直接電気へと変える変換素子である。太陽電池は光エネルギーが太陽電池内部のシリコンに当たることで光起電力効果や光電効果という現象が起こる。[6] その結果、太陽電池を構成する半導体の電子が動き電気が発生する。そのためライトの増加により発電量が増加したと考察できる。また温度が上がると価電子帯の中の一部の電子がエネルギーをもらって伝導帯に飛ぶ熱励起が起きる。[7] そのため電流が流れやすくなり電圧が低下する。これにより電力が低下する。これにより最大値が減少したことが推測できる。

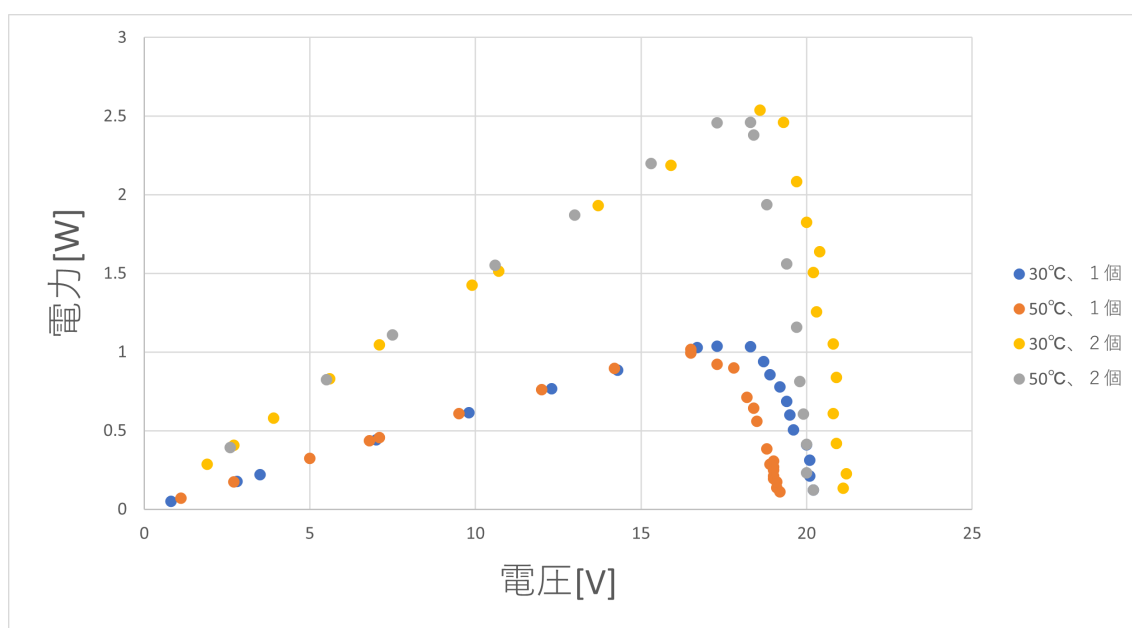


図 22: 太陽電池の電圧電力特性

表 13: 4 条件での最大電力値

A	最適動作電圧 [V]	最大電力 [W]
30 °C、1 個	17.3	1.04
50 °C、1 個	16.5	1.02
30 °C、2 個	18.6	2.54
50 °C、2 個	18.3	2.46

- (ii) MPPT 制御はなぜ必要か説明せよ。また、そのアルゴリズムには「山登り法」と「電圧追従法」がある。これらの特徴を調査し、比較して説明せよ。

MPPT 制御は可能な限り効率よく発電するには最適な電圧電流値が必要であり、それを求めるために必要な制御である。山登り法は電圧と電流を測定し逐一比較することで最大出力電圧にちかづけて発電できる方法である。[4] 電圧追従法は I-V 出力特性を用いて最大出力が出せる電圧を求めて、その電圧に近づける方法である。一般的に使われるのは山登り法である。なぜなら電圧追従法は確実性が低く山登り法のほうが適切な値が確実に算出されるためである。

4 結論

この実験を通じて以下が達成できた。

- ダイオードの原理を知り，実験により整流作用を理解することでダイオードを使用できるようにする。
- ツェナーダイオードの特性を学び，ツェナーダイオードを使用できるようにする。
- 太陽電池の特性を知り，使用できるようにする。

参考文献

- [1] 高木茂孝, 電子回路, 実教出版社, 2022.
- [2] onsemi, Axial-lead glass passivated standard recovery rectifiers, Jun. 2022. [Online]. Available: https://www.mouser.jp/datasheet/2/308/1N4001_D-2309631.pdf 令和 4 年 6 月 15 日.
- [3] onsemi, Zener diodes 1n4728a - 1n4758a. [Online]. Available: https://www.mouser.jp/datasheet/2/308/1N4736AT_D-2309095.pdf 令和 4 年 6 月 15 日.
- [4] 不明, 最大電力点追従制御, <https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/dispersed/data/s01.pdf>, 令和 4 年 6 月 15 日.
- [5] ELJ ソーラーコーポレーション, 太陽光パネルの最新事情は? 設置やメンテナンス、費用について最低限知っておくべきことを解説, <https://www.elj-solar.co.jp/column/p402/>, 令和 4 年 6 月 20 日
- [6] 太陽光発電ラボ, 【光度とは?】輝度・照度の違いとその単位-太陽電池との関係性, https://solar-lab.jp/taiyokou/what_is_light_intensity, 令和 4 年 6 月 23 日
- [7] 太田裕道, 電子デバイス工学 (3), <http://functfilm.es.hokudai.ac.jp/wp-content/uploads/2017/02/device3.pdf>, 令和 4 年 6 月 23 日