

平成 29 年度
卒業研究報告

研究題目

太陽光発電における
放物線楕型ミラーの集光特性

指導教員

由井四海

富山高等専門学校

電子情報工学科

今井利幸

平成 30 年 2 月 22 日提出

1.はじめに	3
2.太陽	4
3.太陽光発電.....	5
3.1 太陽電池の基本原理.....	5
3.2 太陽電池の種類.....	5
3.2.1 単結晶シリコン型太陽電池.....	5
3.2.1.1 原理	5
3.2.1.2 特徴	7
3.2.2 色素増感太陽電池.....	7
3.2.2.1 原理	7
3.2.2.2 特徴	8
3.3 従来の太陽光発電	8
4.放物線楯型ミラー	9
5.太陽の角度計算.....	10
6.反射光の集光位置と太陽電池での光パワーのシミュレーション	11
6.1 反射光の集光位置のシミュレーション.....	12
6.1.1 シミュレーションの概要	12
6.1.2 シミュレーション結果.....	13
6.2 太陽電池での光パワーのシミュレーション.....	17
6.2.1 シミュレーションの概要	17
6.2.2 シミュレーション結果と考察	18
7.実験装置	21
7.1 実験装置の概要.....	21
7.2 実験装置の構成.....	22
7.3 実験装置のミラーの歪み.....	25
7.4 実験装置の集光特性.....	26
7.4.1 実験概要	26
7.4.2 実験結果.....	28
8.実験装置による測定	32
8.1 実験概要.....	32
8.2 実験結果.....	32
9.まとめ.....	35
謝辞	36
参考文献	36

1.はじめに

近年、地球温暖化の影響で豪雨と竜巻、熱波などの「極端な気象」が頻発[1]している。こういった異常気象によって各地で土砂崩れや河川の氾濫などの多大な被害が発生している。そのため、地球温暖化の要因の一つである温室効果ガスの排出量削減が大きな課題となっている。

温室効果ガスの排出量削減策の一つとして、再生可能エネルギーによる発電の普及拡大が挙げられる。再生可能エネルギーによる発電のなかでも太陽光発電は、設置場所の制約が少ないことから普及拡大に期待が持たれている。しかし、「高い発電コスト」や「昼夜や天候による発電量の変動」という問題があり普及拡大の阻害要因となっている。阻害要因の一つである「高い発電コスト」に対する解決策として、光学部品を用いて太陽光の集光を行うことで発電効率を高める集光型太陽電池が挙げられる。

本研究では、光学部品として「放物線楕型ミラー」を用いて集光した太陽光を太陽電池に集めることで、発電効率の向上と発電コストを低減することができる太陽光発電装置[2]の集光特性の評価を行う。

2.太陽の運動

太陽の移動には日周運動と年周運動の 2 つがある。日周運動は地球の自転によって、太陽が 1 日で地球の周りをまわっているように見える、見かけ上の太陽の動きである。年周運動は 1 年を周期とする地球の公転による太陽の動きであり、地球の地軸が傾いていることで季節によって太陽軌道が変化する。季節による太陽軌道の変化を図 1 に示す。

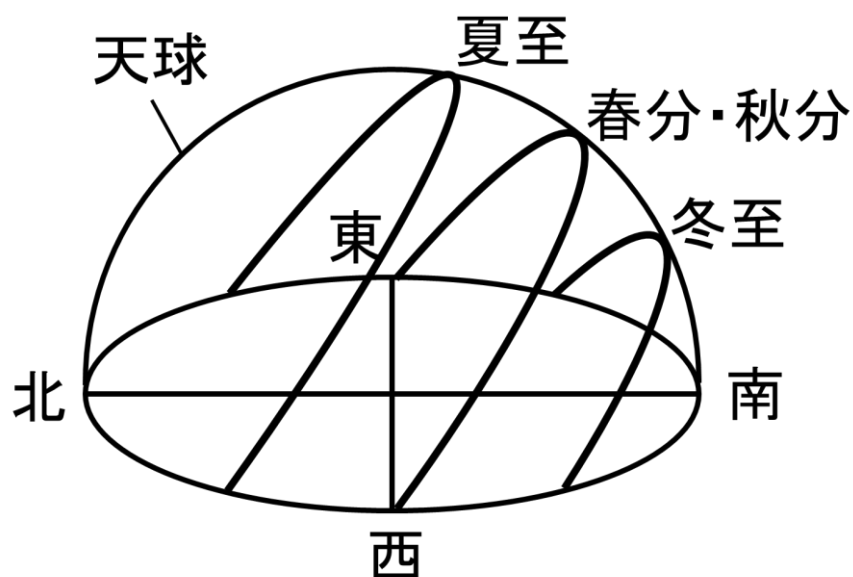


図 1 季節による太陽軌道の変化

春分・秋分（以下軌道が同じであるため春分とする）の日の場合、真東から昇り真西に沈む軌道を通る。夏至の日の場合は北よりの東から昇り天球の頂上を通過して北寄りの西に沈む。冬至の日の場合は夏至の日とは逆に南寄りの東から昇り南寄りの西に沈む。

3.太陽光発電

太陽光発電とは太陽光を太陽電池によって電力に変換する発電方式である。ここでは太陽電池の原理と種類、従来の太陽光発電について説明する。

3.1 太陽電池の基本原理

太陽電池はシリコンなどの素材でできている 2 つ以上の異なる半導体同士を貼り合わせた構造をしている。半導体同士が接している面である接地面に光（光子）が当たることで、接地面に衝突した光子のエネルギーによって電子が物質表面から半導体内に放出される（光電効果）。[3]この電子の移動によって電流が流れる。

3.2 太陽電池の種類

3.2.1 単結晶シリコン型太陽電池

3.2.1.1 原理

単結晶シリコン型太陽電池は半導体として、n型半導体とp型半導体を用いた太陽電池である。pn接合では、空乏層に内蔵電位が発生し、図2のような状態となっている。

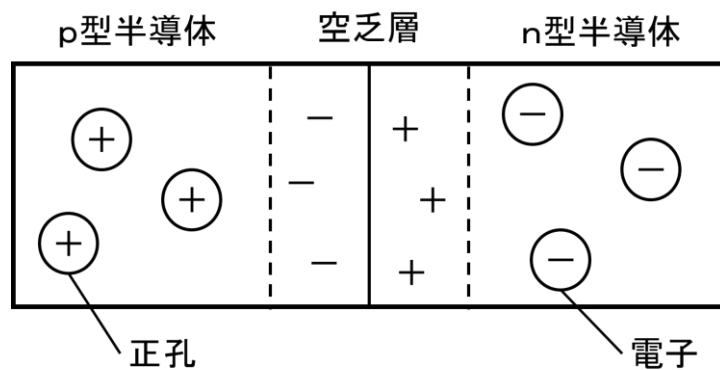


図 2 p n 接合の内部状態

接合部に光が当たり、価電子が禁制帯を飛び越えるのに十分な光エネルギーを受けると、その価電子は価電子帯から伝導帯へ励起され伝導電子となり、価電子帯には正孔が発生する（内部光電効果）。内部光電効果によって発生した伝導電子と正孔は内蔵電位に沿って、伝導電子は n 型半導体へ、正孔は p 型半導体へ移動し、ドリフト電流が増加する。ドリフト電流が増大することにより空乏層内での平衡が崩れ、それまで一定であったフェルミ準位が移動するため、空乏層におけるエネルギーバンドギャップの傾きが変化し、このフェルミ準位のズレが太陽電池の起電力となる。図 3 に太陽電池のエネルギー準位の変化を示す。

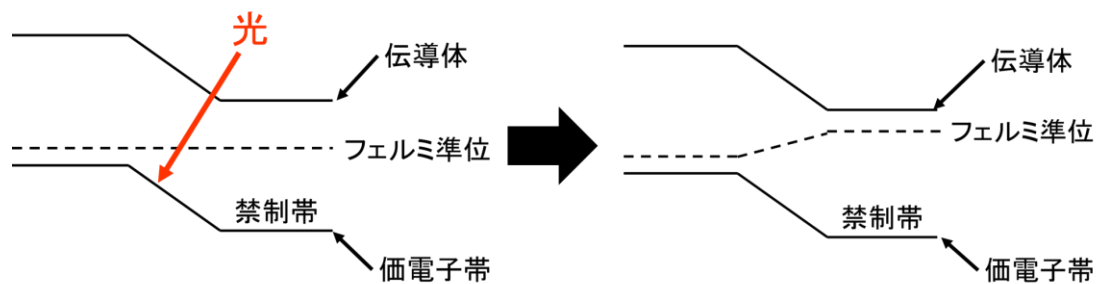


図 3 太陽電池のエネルギー準位の変化

3.2.1.2 特徴

入力したエネルギーに対して、どれだけの電力が発生したかを表す発電効率が、太陽電池の中で最も高い。また、研究が長く続けられてきたため、耐久性や信頼性が高いことが長所である。しかし、原材料である高純度シリコンウェハーや製造にかかるコストが高い、製造方法が大量生産に不向きであるなどの短所がある。

3.2.2 色素増感太陽電池

3.2.2.1 原理

色素増感太陽電池は、インジウム系の透明電導層を表面に持つガラス板や透明プラスチックシートの内側に、二酸化チタンなどの微粒子を固定し、固定した微粒子にルテニウム系の有機色素を吸着させた電極と、白金や炭素などの電極の 2 つの電極間にヨウ素溶液などの酸化還元体を充填したものである。電池に光を照射すると、負極の酸化チタンに吸着している色素が光励起し、色素から酸化チタンへの電子注入が起こり、色素が酸化される。電子を失った色素は、電解液中のヨウ素から電子を奪い還元され、ヨウ素は正極から電子を受け取り元に戻る。色素増感太陽電池の内部構造を図 4 に示す。

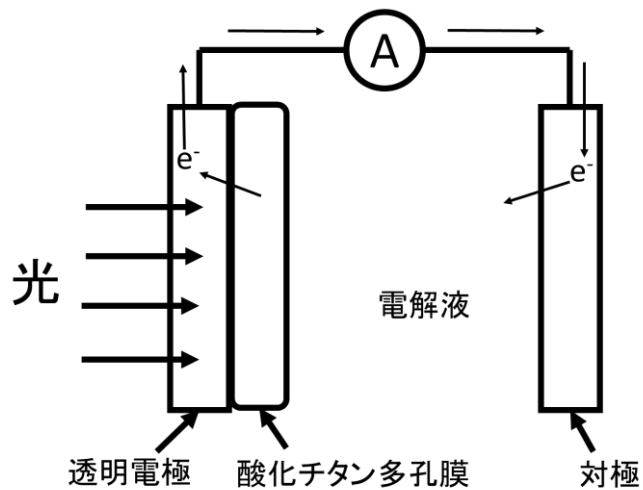


図 4 色素増感太陽電池の内部構造

3.2.2.2 特徴

単結晶シリコン型太陽電池に比べ、製造時のコストが低く、プラスチックシートを用いることで変形が可能である。また色彩が豊かで様々な模様をつけることが可能である。しかし、変換効率が単結晶シリコン型太陽電池より低く、劣化が早く耐久性が低いという短所がある。

3.3 従来の太陽光発電

従来の太陽光発電は、主に単結晶シリコン型太陽電池を用いて発電した電気を蓄電池に貯めることで行われている。太陽光発電には「温室効果ガスを排出しない」、「設置条件が少なく、設置可能面積や場所が多い」、「有害な廃棄物などが発生しない」などの多くのメリットがある。そのため腕時計や人工衛星などの電源として活用したり、屋根の上や地上に直接設置するなどして家庭などでの電源として用いたり幅広い分野で活用されている。

しかし、「発電のコストが高い」、「晴天時と雨天時の発電量に大きな差が出る」、「夜間に発電ができない」などのデメリットがある。その中でも発電コストが高い要因として、「発電効率が15%～20%と低い」や「設置工事費が高い」などが挙げられ、太陽光発電の普及拡大のためには、こういった要因を解決していくことが課題となっている。

4. 放物線樋型ミラー

放物線樋型ミラーは図5のように薄板のミラーを放物線状に湾曲させた形状のミラーである。放物線ミラーには照射された光を焦点位置に集光する特性がある。この特性はパラボラアンテナなどに用いられている。

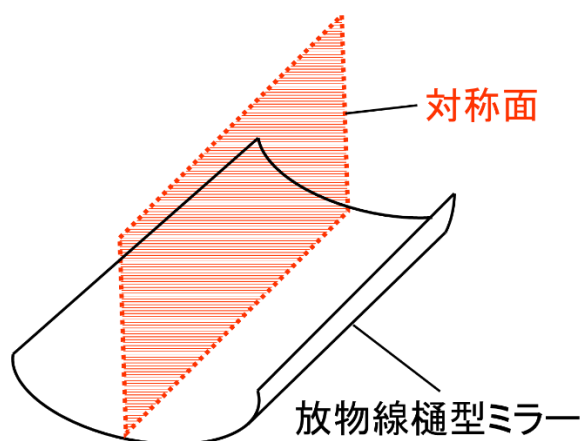


図5 放物線樋型ミラー

放物線ミラーの特性を応用した放物線樋型ミラーは、対称面に対して平行に入射した光を焦点位置に集光することができる。[4]これにより入射した光を直線状に集光することが可能となる。図6に放物線樋型ミラーの集光特性を示す。

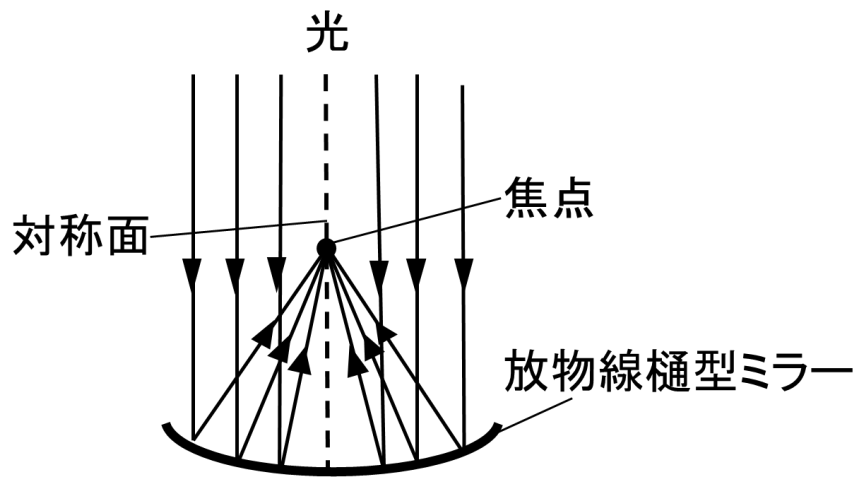


図 6 放物線楕型ミラーの集光特性

5. 太陽の角度計算

ここでは、本研究のシミュレーションや実験装置の制御に用いた角度計算について説明する。太陽の軌道と太陽の仰角と方位角について図 7 に示す。

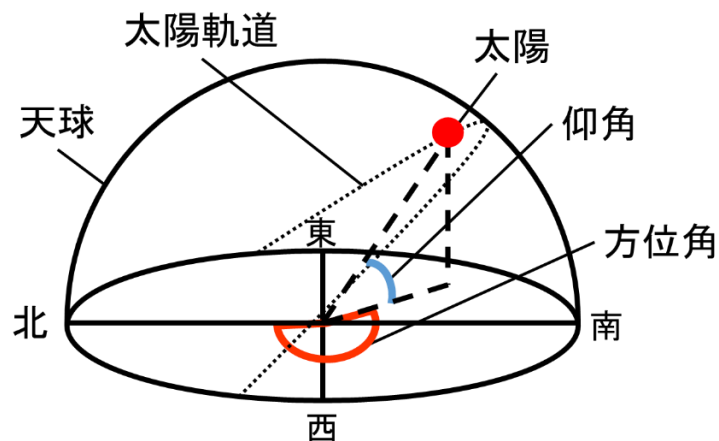


図 7 仰角と方位角

仰角は天球の中心から太陽を見上げた時の地面との角度を指し、方位角は北を基準とし、

左回りで太陽がある方位までの角度のことを指す。

仰角 θ と方位角 φ から、太陽の角度を x 方向と y 方向の 2 つに分けた角度である角 α と角 β を計算した。角 α と角 β を図 8 に示す。

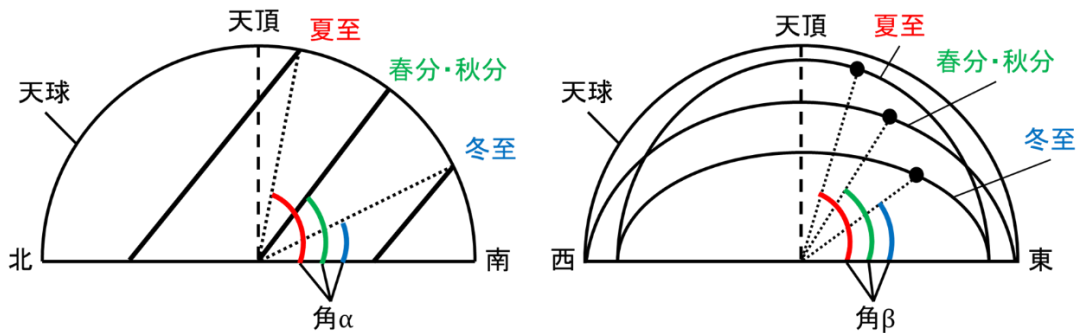


図 8 角 α と角 β

$\varphi \leq 270$ のときの角 α は

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sin \theta}{\cos \theta \cdot \cos(\varphi - 180)} \quad (5.1)$$

で表される。また、 $\varphi > 270$ のときの角 α は

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sin \theta}{\cos \theta \cdot \cos(360 - \varphi)} \quad (5.2)$$

で表される。角 β は

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\sin \theta}{\cos \theta \cdot \cos(90 - \varphi)} \quad (5.2)$$

で表される。

本研究では緯度を北緯 20° 、経度を東経 135° として計算を行った。

6. 反射光の集光位置と太陽電池での光パワーのシミュレーション

ここでは光学設計ソフトウェアの ZEMAX を用いて行ったシミュレーションの概要と結

果を示す。シミュレーションでは、ZEMAX 上で太陽電池、ミラー、光源を図 9 のように配置して行った。

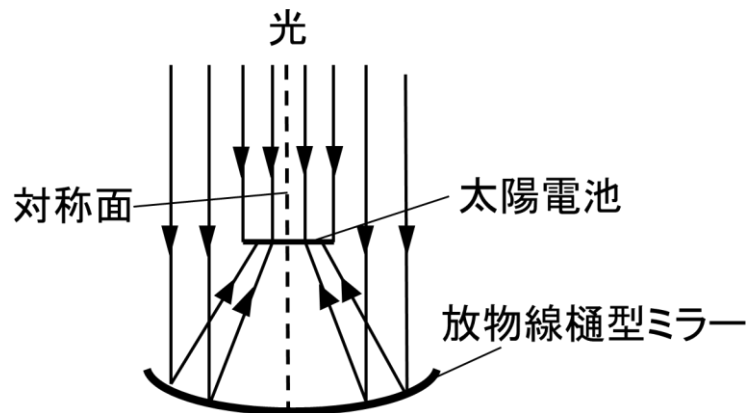


図 9 シミュレーションでの部品配置

6.1 反射光の集光位置のシミュレーション

6.1.1 シミュレーションの概要

光源から照射された光が太陽電池上のどのように集光されるかを、太陽電池とミラーの距離が 250mm（焦点距離）、220mm、280mm の場合の 3 パターンをシミュレーションし確認した。さらに、太陽電池とミラーの距離が焦点距離の場合のみ、光源を左右にそれぞれ 10° 傾けた時の集光位置のシミュレーションを行った。太陽電池の大きさは $210 \times 220\text{mm}$ とした。ミラーの曲率は 0.001 とし、大きさは $293 \times 500\text{mm}$ とした。また、光源は大きさを $400 \times 800\text{mm}$ とし、パワーを 224W とした。

6.1.2 シミュレーション結果

太陽電池上での集光状態のシミュレーション結果をミラーから太陽電池までの距離ごとに以下にまとめる。カラースケールの横に示されている数値は太陽電池上での光パワーを表している。

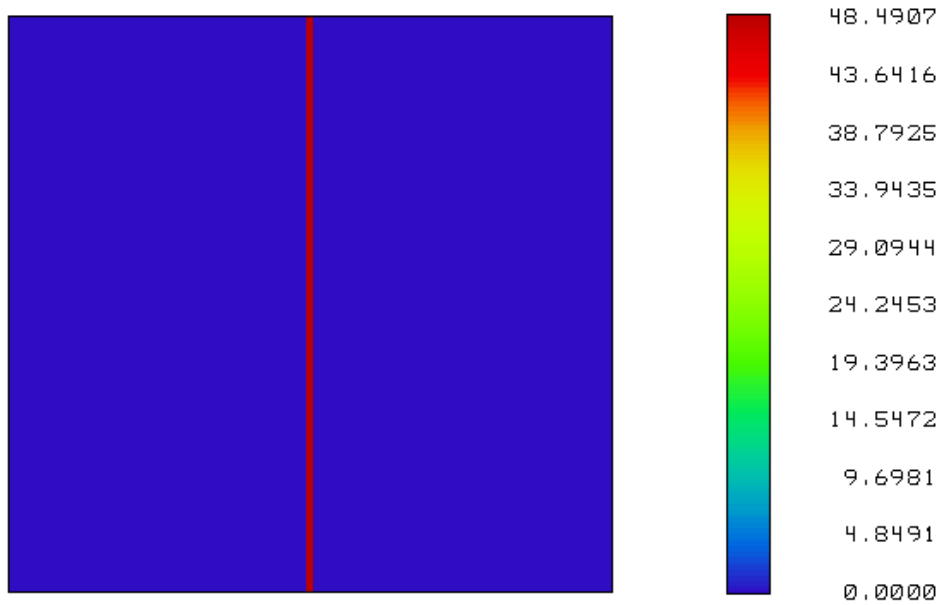


図 10 ミラーと太陽電池の距離が 250mm (焦点距離) の場合の太陽電池上での集光状態

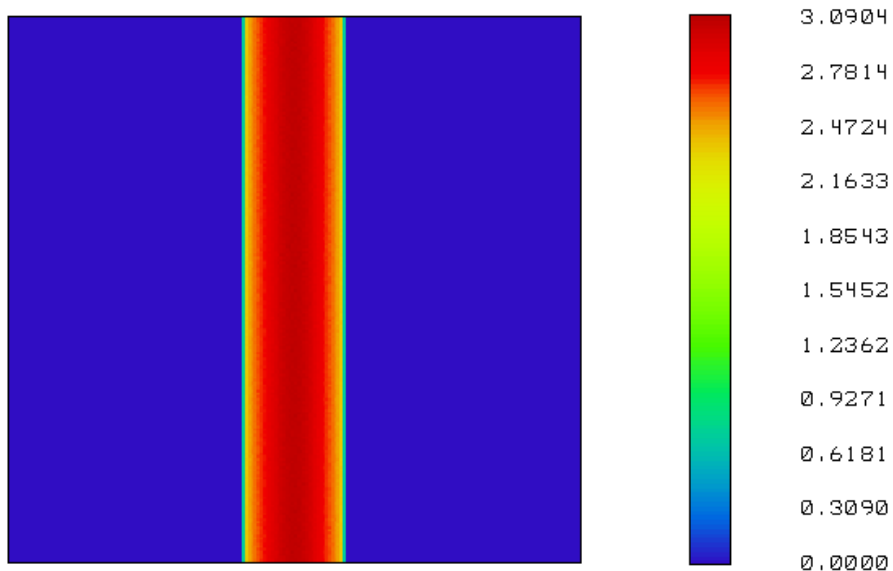


図 11 ミラーと太陽電池の距離が 220mm の場合の太陽電池上での集光状態

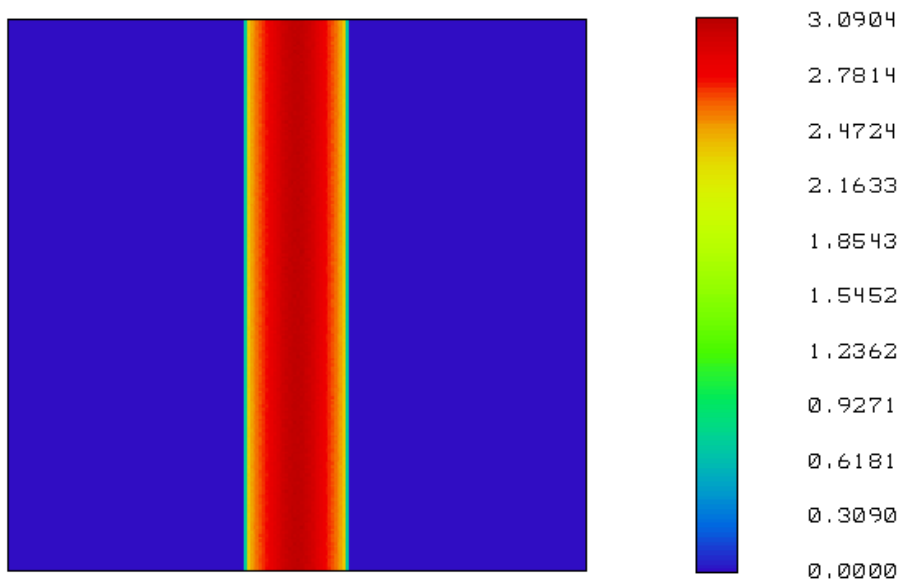


図 12 ミラーと太陽電池の距離が 280mm の場合の太陽電池上での集光状態

焦点位置に太陽電池を配置した場合、反射光が一直線上に狭い幅で集まっていることが確認できる。ミラーと太陽電池の距離が 220mm と 280mm の場合でも太陽電池の中央付近に多く反射光が集まっているが、焦点距離に太陽電池を配置した場合より集光された光の幅が広がっていることが分かる。集光された光の幅はミラーと太陽電池との距離が 220mm 場合と 280mm の場合の両方で約 40mm となった。

次に焦点距離に太陽電池を配置し、光源を夏至と冬至の場合と同じ状況である、左右に傾けた時の集光状態も確認した。左右に傾けた場合の部品配置を図 13 に、集光状態を図 14、図 15 に示す。

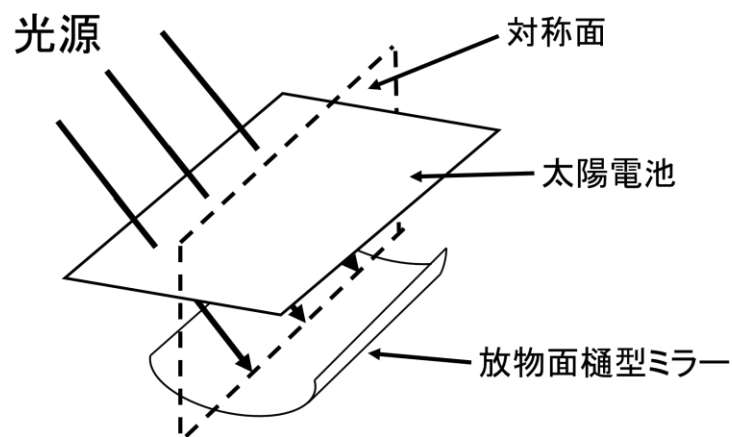


図 13 部品配置

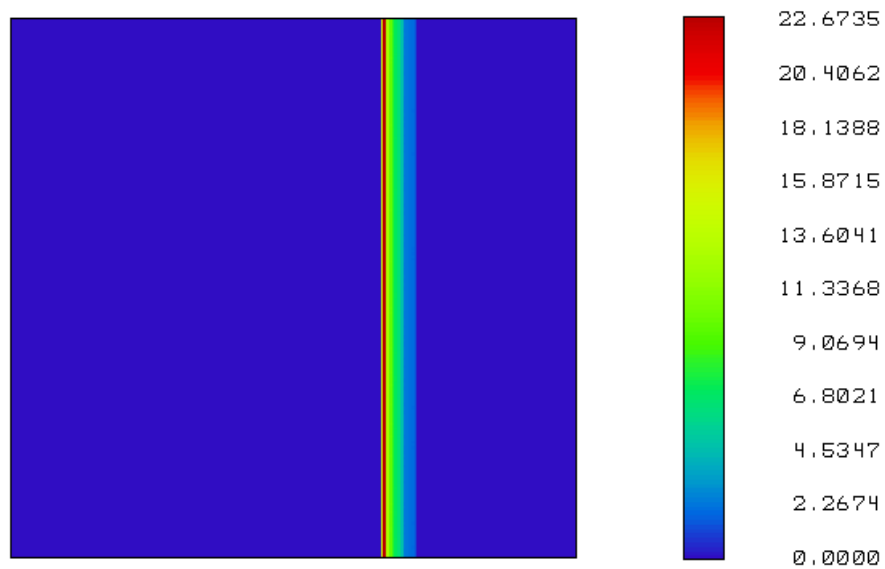


図 14 光源を左に傾けた時の集光位置

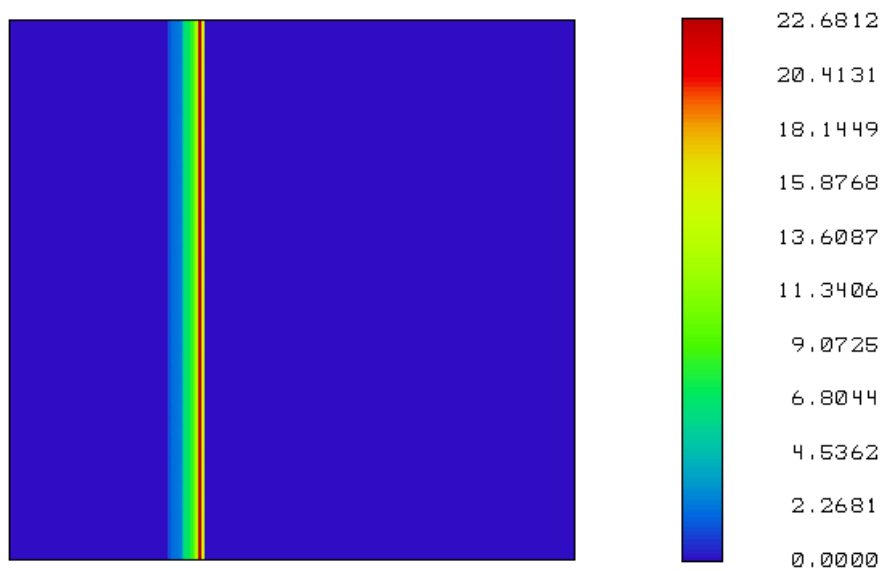


図 15 光源を右に傾けた時の集光位置

光源を左に傾けた場合、集光位置は右側にずれ、光源を右に傾けた場合は左側に集光位置がずれることが分かった。また、集光される光の幅が、完全な一直線ではなく片方向に広がるということが分かった。

6.2 太陽電池での光パワーのシミュレーション

6.2.1 シミュレーションの概要

太陽電池は集光された光が全体に当たるよう、焦点距離より短い 220mm の位置に配置した。太陽軌道は正午を中心に午前と午後で対称であるため本研究では 12 時から 18 時までの各季節でのシミュレーションを行った。太陽軌道に対してミラーは長手方向の両端が、それぞれ東と西を向くように配置した。また、ミラーが 12 時での各季節の太陽に正対するように配置し、春分、夏至、冬至での 1 時間ごとの太陽の角度を光源の傾きを変化させることで再現し、シミュレーションを行った。シミュレーションでは単位面積当たりの光パワーの値を揃えた。ミラーによる集光を行わない場合のシミュレーションも同様に行い、ミラーによる集光を行った場合の結果と比較した。シミュレーションの様子を図 16 に示す。

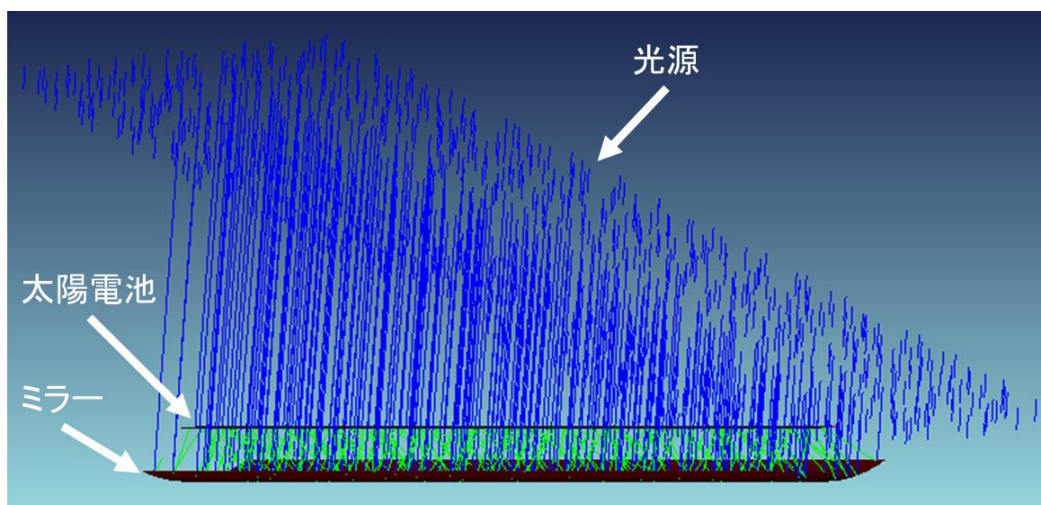


図 16 シミュレーションの様子

6.2.2 シミュレーション結果と考察

以下にミラーを用いた場合と、用いない場合のそれぞれについて、季節ごとの太陽電池の光パワーの時間変化を示す。また、図 19 に光パワーの総和の季節による変化を示す。

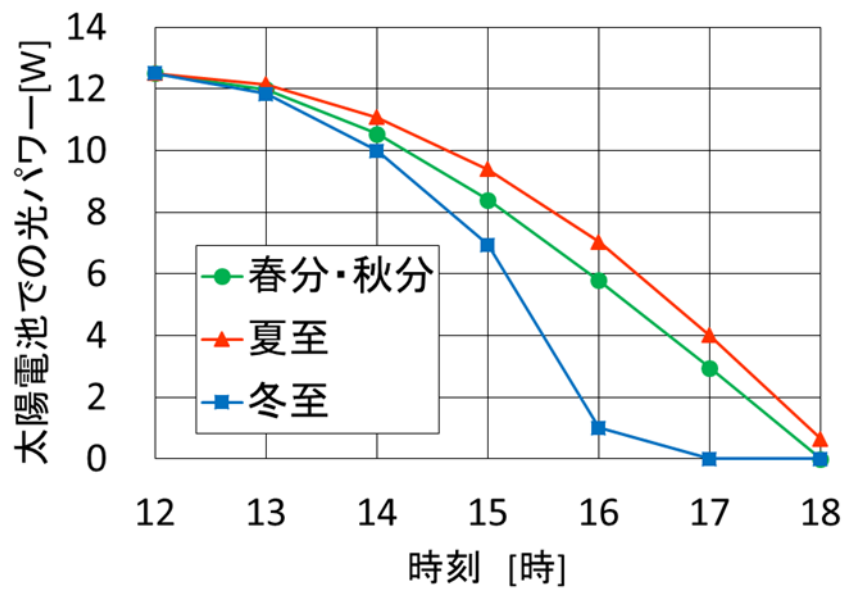


図 17 季節ごとの太陽電池での光のパワーの時間変化（ミラーなし）

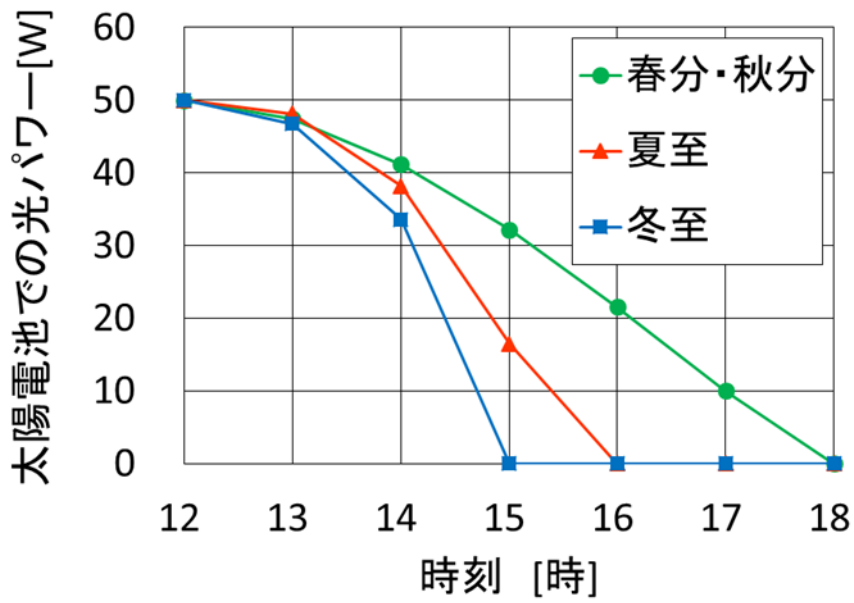


図 18 季節ごとの太陽電池での光のパワーの時間変化（ミラーあり）

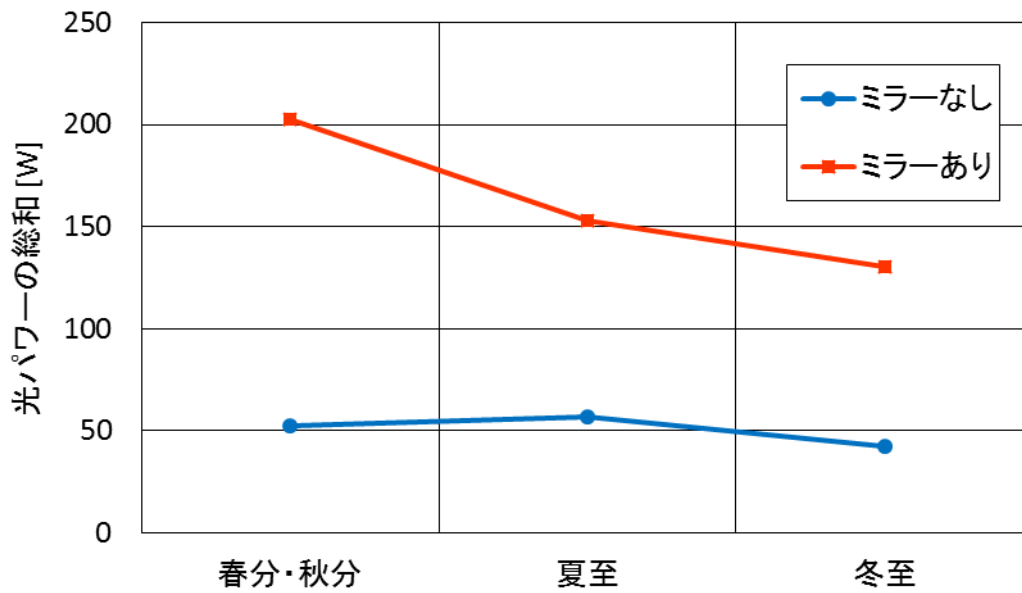


図 19 光パワーの総和の季節による変化

春分・秋分の日の結果では、ミラーを用いた場合の方が 12 時から 18 時までの全ての時刻でミラーを用いない場合より、高い光パワーを得られている。12 時から 18 時までの光パワーの総和もミラーを用いた方が、ミラーを用いない場合の約 3.9 倍になっている。このシミュレーション結果からミラーの集光により発電効率を高めることが可能であると考えられる。

夏至と冬至の日の結果を見ると、ミラーを用いた場合に夏至では 16 時、冬至では 15 時の時点で太陽電池での光パワーが 0 になっている。春分・秋分の日太陽の軌道が常に放物線楕型ミラーの対称面上を通るのに対し、夏至と冬至の日太陽の軌道は正午を中心に時刻にともない、放物線楕型ミラーの対称面上から大きく外れてしまう。そのため、夏至と冬至の場合には集光位置がずれ、太陽電池に光が当たらなくなる。しかし、12 時から 18 時までの光パワーの総和を比較すると、ミラーを用いた場合がミラーを用いない場合の夏至で約 2.8 倍、冬至で約 3.6 倍となっている。このことから、光が太陽パネルに当たる時間が短い場合でもミラーを用いた方が高い光パワーを得ることができることが分かる。

これらのシミュレーション結果からミラーを用いることで太陽軌道が対称面上からずれる夏至と冬至の場合でも、太陽電池を傾けることなく太陽光を太陽電池に当てることができ、発電効率が集光量に比例する場合、1 年を通して発電効率の大幅な向上が見込める。

7.実験装置

ここでは製作した実験装置の概要と構成について説明する。

7.1 実験装置の概要

ミラーと太陽電池が一体となったユニットをサーボモーターで傾けることで、1時間ごとの太陽のX軸、Y軸方向の傾きを2つのサーボモーターを用いて再現する。スイッチを押した5秒後にサーボモーターが動作を開始する。太陽電池のミラーからの距離は220mmとして測定を行う。実験装置には、ミラーと正対している太陽電池が3枚、その太陽電池とは逆向きに1枚設置されている。これによって、ミラーによる集光を行う場合とミラーによる集光を行わない場合の出力電流を同時に測定可能である。図20に作成した実験装置の外形を示す。

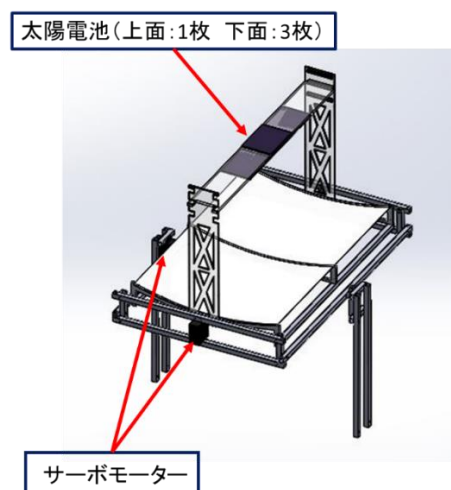


図 20 実験装置の外形

7.2 実験装置の構成

実験装置には以下の機器を使用した。

太陽電池

製品名 太陽電池パネル

製造元 Sanyo

型番 AM-1816CA

200Lx での定格値 解放電圧：4.9V 短絡電流：94 μ A 動作特性：84 μ A

保存動作温度：-10 $^{\circ}$ C \sim 60 $^{\circ}$ C

ミラー

製品名 どこでもミラー

製造元 光

型番 DKM-2944

サイズ 297 \times 445 \times 0.5mm

ミラーの曲率 0.001

サーボモーター

製品名 高トルク アナログサーボ

製造元 POLOLU

型番 FS5115M

動作電圧 4.8～6 V

回転速度 0.16 sec / 60°

ストールトルク 15.5 kg・cm

ワンボードマイコン

製品名 Arduino Uno

製造元 Arduino

型番 A000066

マルチメーター

製品名 デジタルマルチメーター

製造元 三和電気計器

型番 PC700

ノートパソコン

製品名 dynabook R732

製造元 TOSHIBA

型番 PR73225HSNRE

プロセッサ Intel(R) Core(TM) i5-3230M CPU @ 2.60GHz

実装メモリ 12.0 GB

実験装置の構成を図 21 に示す。

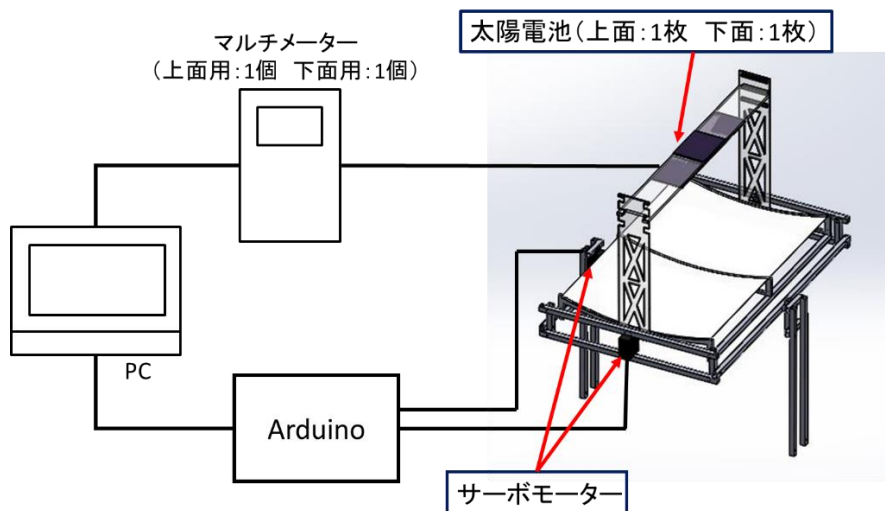


図 21 実験装置の構成

製作した実験装置では Arduino を用いてサーボモーターの角度制御を行った。そして、マルチメーターを用いて太陽電池の出力電流を測定した。

7.3 実験装置のミラーの歪み

製作した実験装置のミラーは薄板型のミラーをアルミフレームに沿わせることで曲面ミラーにしている。図 22 に実験装置のミラーの取り付けの状態を示す。

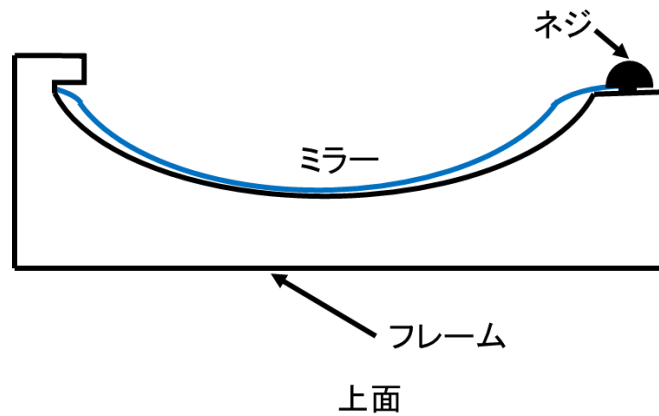


図 22 ミラーの取り付けの状態

ミラーは図 22 のような形のアルミフレームを 3 つ用いて支えられている。片側をネジによって止めているため、そこで歪みが生じている。図 23 にミラーの歪みの状態を示す。

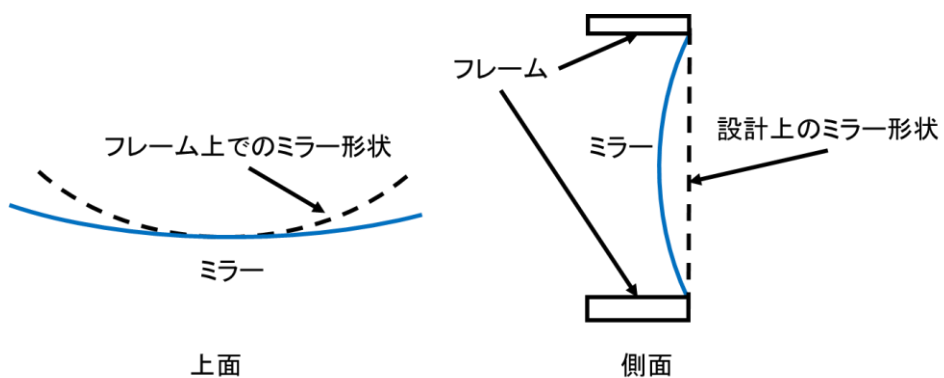


図 23 フレームとフレームの間でのミラーの歪み

側面図を見るとフレームとフレームの間の部分のミラーがたわんでいることが分かる。

これは、ミラーの厚みが薄いためフレームに沿っていない部分のミラーが重みで歪んだためだと考えられる。また、このたわみによって上面から見た時にフレーム上でのミラーより外側に開いてしまっている。

7.4 実験装置の集光特性

7.4.1 実験概要

実験装置で測定を行うにあたり、製作した実験装置が入射した光を計算通りの位置に集光できているかを確認する必要がある。そこで、遠距離から点光源（白色ダイオード）の光をミラーに照射し、反射光がどのように集光されているかをミラーと太陽電池の距離ごとに調べた。実験は光源とミラーとの間に紙を設置し、紙に投影された反射光をカメラで撮影することで行った。紙とミラーとの距離は 220mm、250mm、280mm の 3 パターンで実験を行った。また、光源が対称面上から外れた場合の集光状態を確認するために、光源の位置をミラーの対称面を基準に対称となるように x 軸方向にそれぞれ 200mm ずらした場合での実験も同様に行った。図に、集光位置の確認に用いた実験装置の上面・側面図を示す。

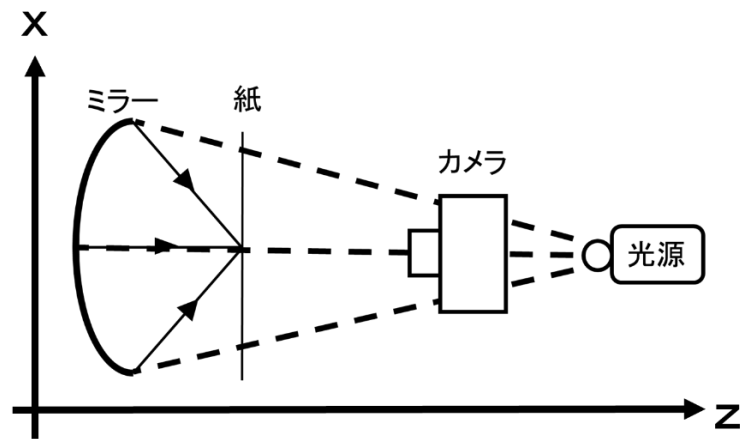


図 24 集光実験に用いた実験装置の上面図

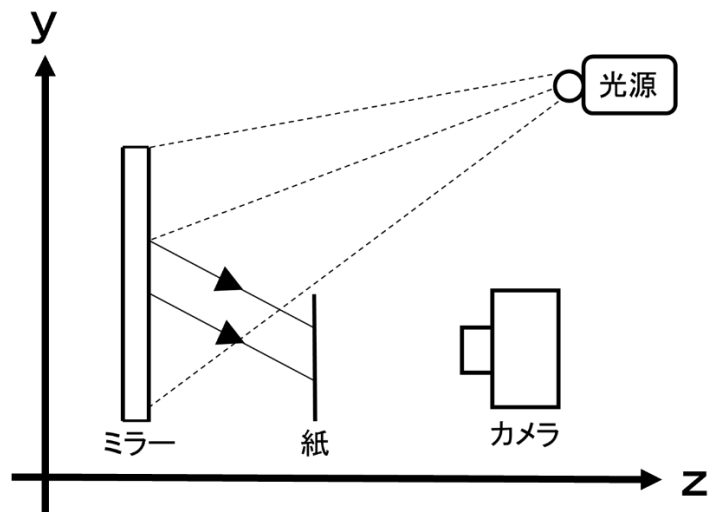


図 25 集光実験に用いた実験装置の側面図

ミラーとカメラとの距離を 900mm、ミラーと光源との距離を 1400mm とした。

7.4.2 実験結果

実験結果を以下にまとめる。

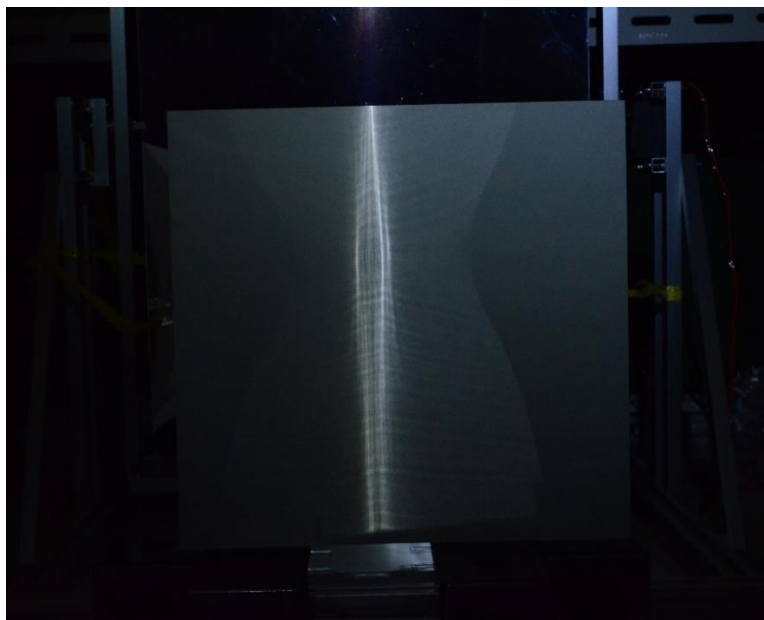


図 26 ミラーとの距離が 220mm の場合の反射光

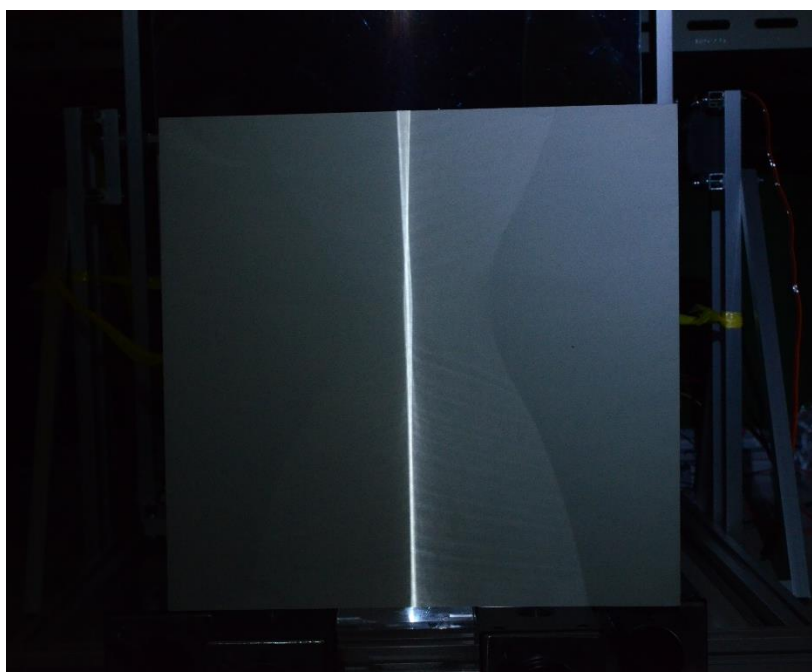


図 27 ミラーとの距離が 250mm (焦点距離) の場合の反射位置

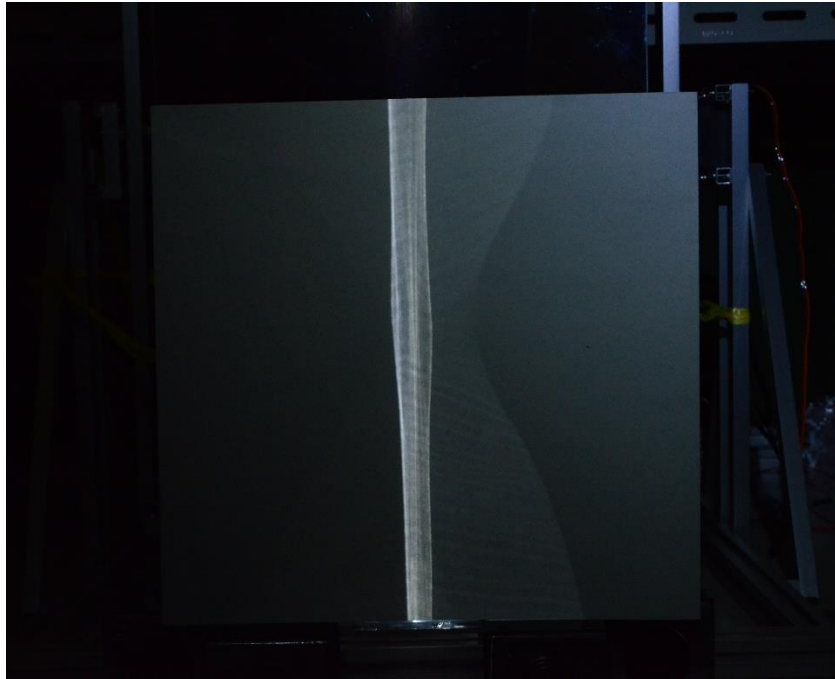


図 28 ミラーとの距離が 280mm の場合の反射位置

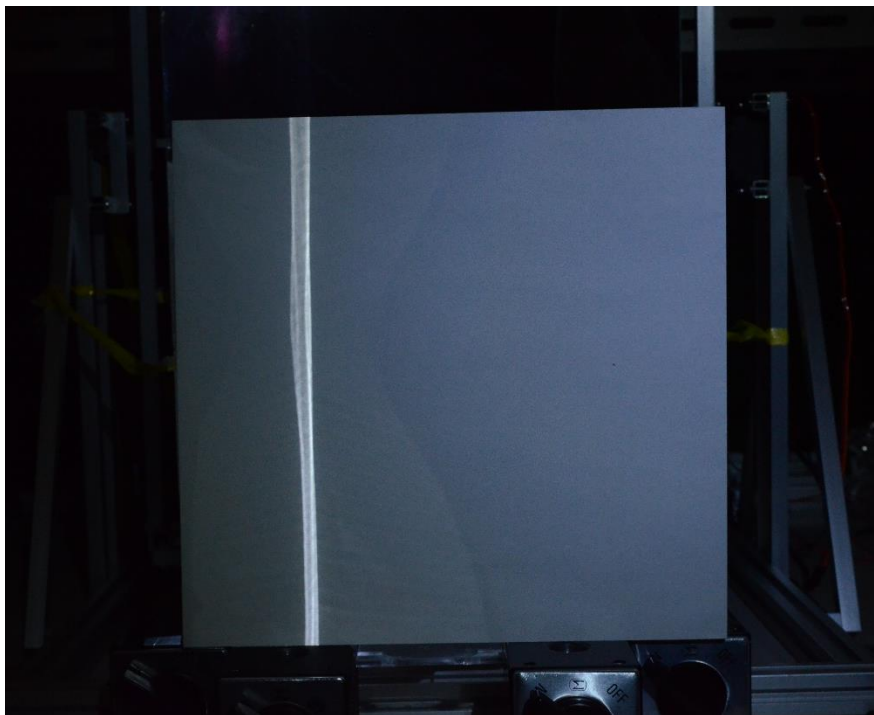


図 29 光源の位置を右にずらした場合の反射位置 (ミラーとの距離 250mm)

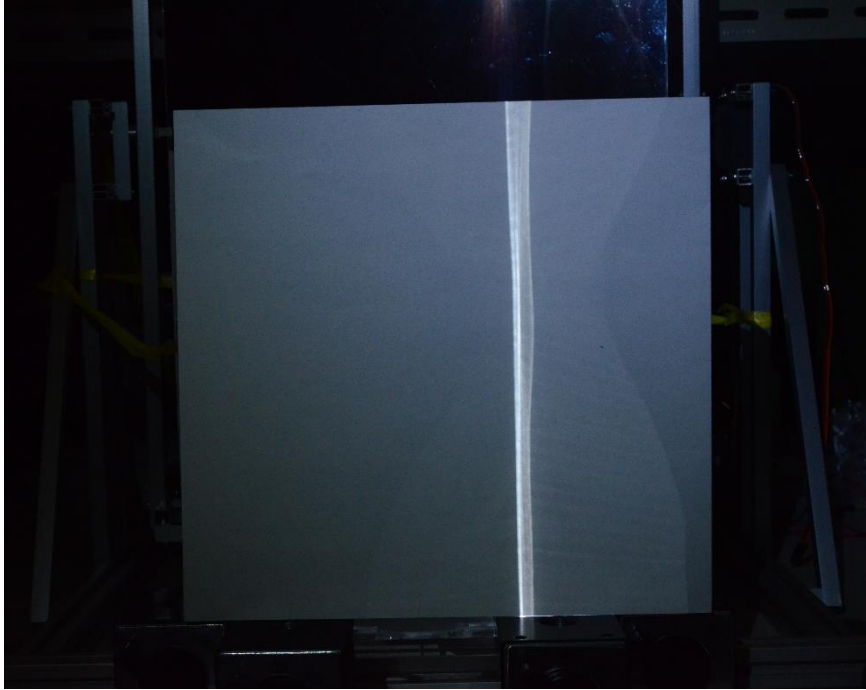


図 30 光源の位置を左にずらした場合の反射位置（ミラーとの距離 250mm）

図を見るとミラーからの距離が 250mm の場合ではミラーによる反射光が、ほぼ一直線上に集まっていることが分かる。また、250mm での反射位置とそれ以外の距離での反射位置の比較結果からも、設計上での焦点距離である 250mm の位置に集光で来ていることが確認できた。

さらに、ミラーとの距離が 220mm の場合と 280mm の場合で集光された光の幅が焦点距離に紙を置いた場合より広がっていることも確認できた。しかし、ミラーの歪みがあるため紙に写っている集光された光が歪んでいる部分が見られた。

光源を左右にずらした場合の結果からは、シミュレーションと同様にずらした位置に伴って反射位置がずれ、集光される光の幅が広がることが確認できた。

7.4.3 シミュレーション結果との比較

上記 6.1.2 のシミュレーション結果から求めた光の幅と実験装置の集光特性の実験から得た光の幅を測定し比較した。ミラーと太陽電池との距離による集光される光の幅の変化のグラフを図 31 に示す。

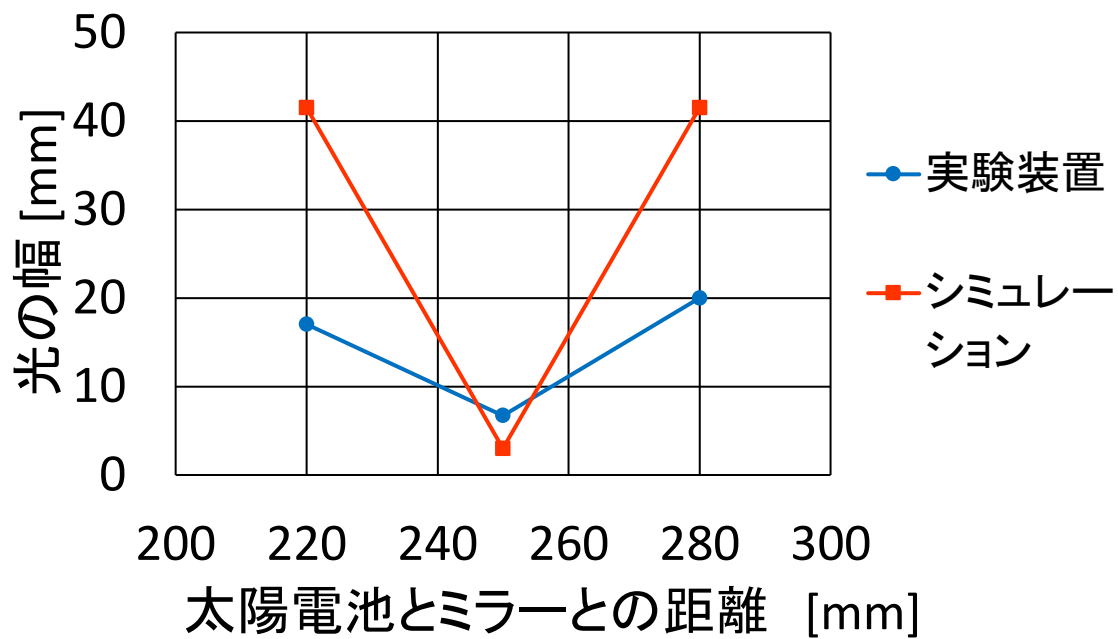


図 31 ミラーと太陽電池との距離による集光される光の幅の変化

実験装置の集光による光の幅は、太陽電池とミラーとの距離が焦点距離の時にシミュレーション結果より広く、220mm と 280mm の時にシミュレーション結果の約半分の幅となった。

この結果から実験装置にはミラーの歪みによる影響が出ていると考えられる。

8.実験装置による測定

8.1 実験概要

太陽を光源として測定を行う。まず、実験装置のサーボモーターの角度を初期位置に合わせた状態で太陽とミラーを正対させる。その状態でプログラムを実行し、電流を測定するパネルを切り替えながら動作させる。マルチメーターによるデータ取得は 0.1 秒間隔で行い、測定するパネルのスイッチングを 0.5 秒ごとに行うようにした。

8.2 実験結果

マルチメーターを用いて測定した太陽電池の出力電流の変化量を測定した結果をまとめたものを以下に示す。測定結果は春分・秋分の時の出力電流の最小値を基準とし、太陽の散乱光の成分を除去したものとなっている。

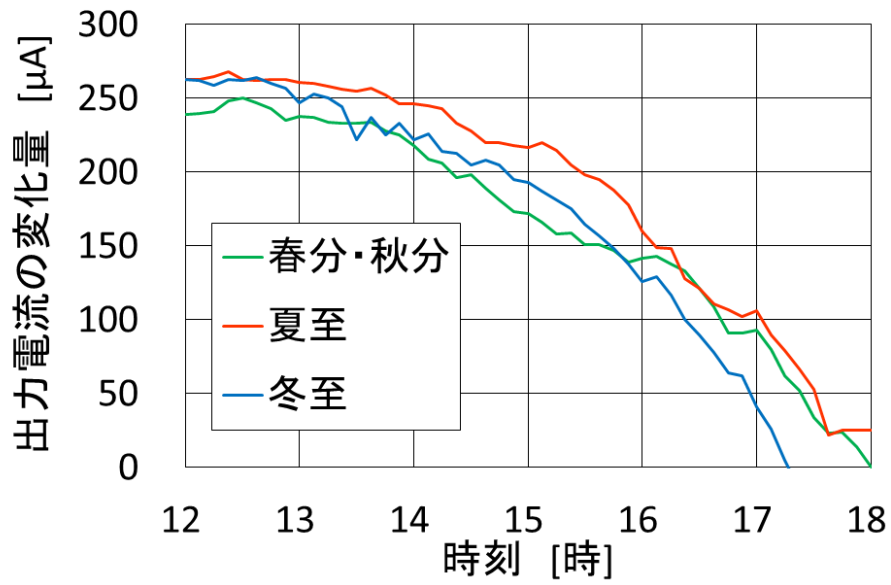


図 32 太陽電池の出力電流の変化量の時間変化 (ミラーなし)

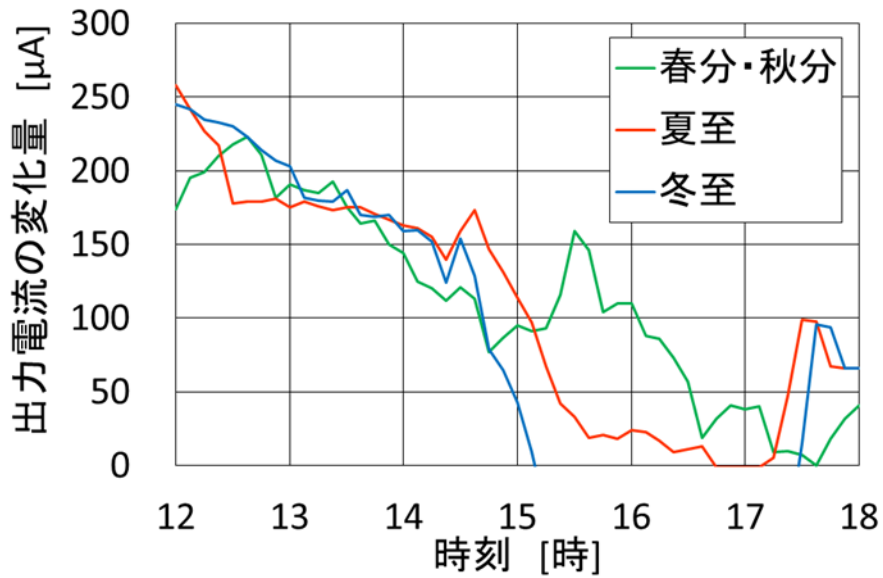


図 33 季節ごとの太陽電池の出力電流の変化量の時間変化 (ミラーあり)

ミラーなしの場合の結果を見ると春分・秋分、夏至、冬至の全てで、太陽電池の出力電流が時刻にともなって小さくなっている。この結果は、図 17 に挙げたシミュレーション結果と比較しても同様の傾向が得られていることが分かる。

ミラーありの場合の結果を見ると、14 時から 15 時にかけて夏至と冬至の出力電流が急激に小さくなっている。また、15 時から 17 時の間で出力電流が春分・秋分、夏至、冬至の順に大きくなっている。これらの結果からも、図 18 に挙げたシミュレーション結果と同様の傾向が得られているといえる。ミラーありの場合で、夏至、冬至における 17 時以降の出力電流が急激に上昇しているのは実験装置のセッティング誤差によって、本来当たることのない太陽光が直接、太陽電池に当たってしまったためだと考えられる。

今回の結果では、ミラーありの場合となしの場合の出力電流には大きな差が見られなかった。原因としては、集光による光の幅が太陽電池の幅より狭かったことで、陰になったセルの影響が太陽電池全体に波及するといった太陽電池の特性による影響が出たことが挙げられる。

9.まとめ

放物線楯型ミラーを用いて発電効率を高める集光型太陽光発電装置の集光特性の評価を行った。評価はシミュレーションと実験装置での測定の2つで行った。

シミュレーションの結果から、放物線楯型ミラーが対称面に対して平行に入射した光を焦点位置に集光するという確認をすることができた。また、春分・秋分、夏至、冬至のいずれの場合にもミラーによる集光により、ミラーを用いない場合よりも高い光パワーを得られることが分かった。

製作した実験装置の集光位置を確認し、設計上での焦点距離である 250mm の位置で直線状に集光されていることが確認できた。点光源の位置を左右にずらした場合でも、シミュレーションと同様に集光位置も左右にずれることが分かった。しかし、ミラーの歪みなどの要因から、ミラーと紙の距離が 220mm と 280mm の場合に集光された光の幅がシミュレーション結果の約半分の幅となっていることが分かった。

実験装置による測定ではミラーなしとミラーありの場合の両方でシミュレーション結果と同様の傾向を得ることができた。しかし、出力電流の変化には大きな差が見られなかったため太陽電池の特性などを考慮した実験装置の改良が必要である。

謝辞

本研究に際して、ご指導をいただいた国立富山高等専門学校電子情報工学科、由井四海准教授、並びに越後敬介様に深謝いたします。また、多くのご指摘をくださいました、由井研究室の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1]. 全国地球温暖化防止活動推進センター http://www.jccca.org/pamphlet_panel/panel/
- [2]. NEDO,太陽光発電開発戦略 <http://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf>
- [3]. 藤本晶（著）. 基礎電子工学. 森北出版, 2014
- [4]. Keisuke Echigo, "Analysis of the Optical Characteristics of Parabolic Trough Collectors for Solar Power Generation System", Journal of Japan Solar Energy Society 42(3), 63-72, 2016