

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

2019 年度

修士論文

高倍率集光型太陽光
コージェネレーションシステムに関する研究

2020 年 2 月 6 日提出

指導教員 党 超鋌 准教授



学籍番号 47186726

平井 翔

目次

第1章 序論.....	3
1.1 太陽光利用の意義.....	3
1.2 太陽光エネルギーの利用技術.....	5
1.2.1 太陽光発電.....	5
1.2.2 太陽熱利用.....	7
1.3 集光型太陽光発電・熱利用システム.....	11
1.4 本研究の目的.....	15
第2章 研究の方法.....	16
2.1 研究の手順.....	16
2.2 実験に用いる CPVT および各機器の概要.....	16
2.2.1 放物面集光器.....	17
2.2.2 太陽追尾装置.....	19
2.2.3 InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池.....	21
2.2.4 熱交換器.....	23
2.2.5 その他の装置.....	26
2.3 実験の方法.....	29
2.4 発電と集熱の効率の評価方法.....	31
2.4.1 発電効率の評価方法.....	31
2.4.2 集熱効率の評価方法.....	31
第3章 実験結果と考察.....	33
3.1 放物面集光器の焦点の大きさの推定.....	33
3.1.1 焦点の大きさの推定の原理.....	33
3.1.2 焦点の大きさの推定のための実験の方法.....	34
3.1.3 焦点の大きさの推定のための実験の結果.....	37
3.1.4 実験結果の妥当性のシミュレーションによる検証.....	38
3.2 放物面集光器の反射率の測定結果.....	40
3.3 InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池の発電効率測定.....	42
3.4 単相流を用いた集熱実験の結果と考察.....	44
3.4.1 集熱実験の方法.....	44
3.4.2 集熱実験の結果と考察.....	44
3.5 気液二相流による発電・集熱実験の結果と考察.....	46

3.5.1 気液二相流による発電・集熱実験の集熱効率	48
3.5.2 気液二相流による発電・集熱実験の発電効率	48
第4章 焦点における放射照度分布の均一化に関する研究	50
4.1 緒言	50
4.2 拡散器に関するシミュレーション	53
4.2.1 解析の方法と条件	53
4.2.2 解析結果と考察	55
4.3 本章の結言	61
第5章 結論	62
参考文献	63
謝辞	67

第1章 序論

1.1 太陽光利用の意義

エネルギー資源の枯渇や地球温暖化を始めとする問題が深刻化しつつあるなか、近年、持続可能かつ二酸化炭素を排出しないという点で再生可能エネルギーが多く、多くの国で注目を集めている[1-2]. 2015年9月に開催された「国連持続可能な開発サミット」においては、2030年までに世界のエネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を大幅に拡大させること等を盛り込んだ成果文書[3]が採択され、また近年では再生可能エネルギーの開発に毎年250億ドルを超える資金が投入される(図1.1)など、今後も再生可能エネルギーの利用は世界的に拡大を続けることが見込まれている(図1.2).

再生可能エネルギーとは、太陽光、風力、水力、バイオ燃料、地熱など、一度利用しても再生可能で枯渇することのないエネルギーである。これらのうち、単位時間あたりのエネルギー量は太陽光が圧倒的に大きく、60分間に地球に降り注ぐ太陽光エネルギーで人類が1年間に消費するエネルギーをすべて賄えるほどである[4-5]. 太陽光のエネルギーを利用する技術は古くから研究が進められ、その一つである太陽光発電は現在では実用的な発電方式のひとつとして各国の固定価格買取制度等の後押しも受けて急速に普及が進みつつある[6](図1.3). 持続可能な人類社会を築くうえで再生可能エネルギーの筆頭たる太陽光エネルギーの利用を拡大するため、太陽光利用技術のいっそうの効率向上・低価格化を目指す技術開発や研究は不可欠である。

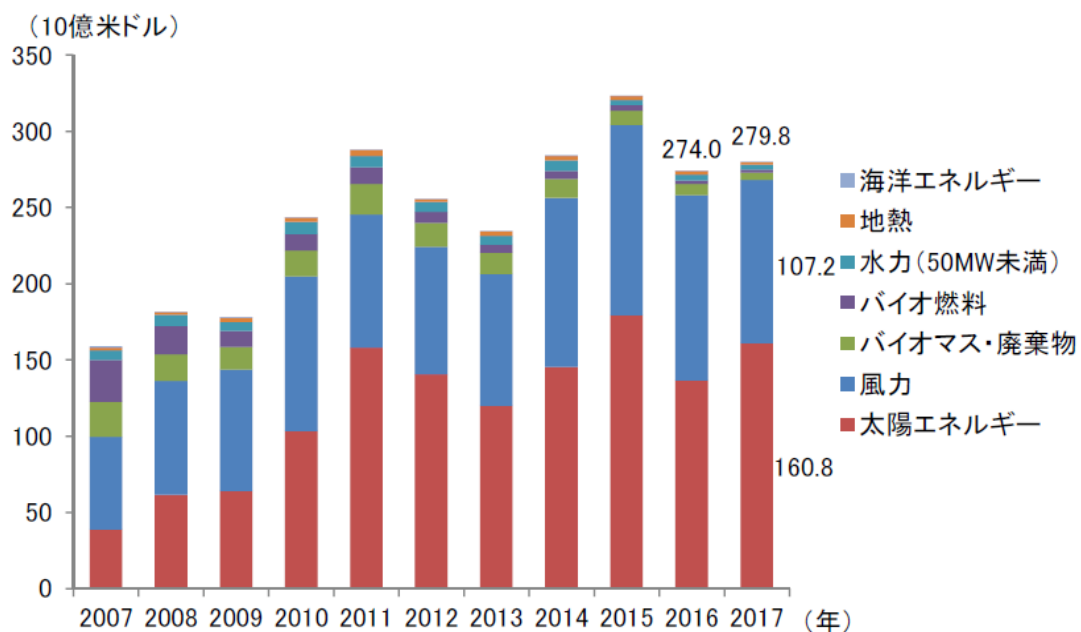


図 1.1 再生可能エネルギーへの投資動向[6].

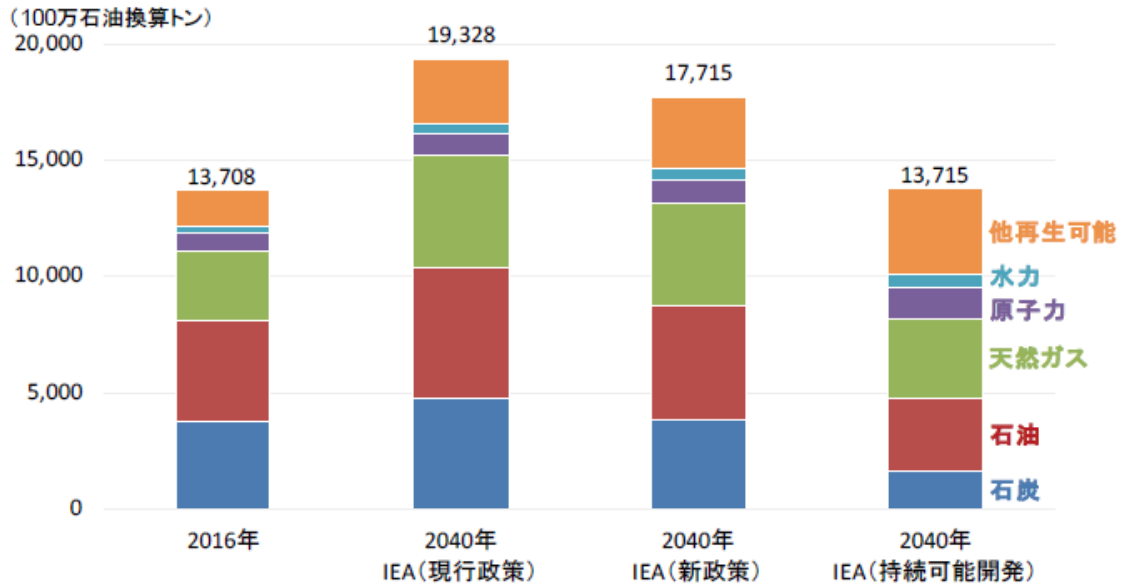


図 1.2 世界のエネルギー需要展望. 国際エネルギー機関(IEA)が想定する 3 通りの政策シナリオの各々について, 2040 年におけるエネルギー需要を予測したもの. 現行政策, 新政策, 持続可能開発の順に気候変動対策が強くなる[6].

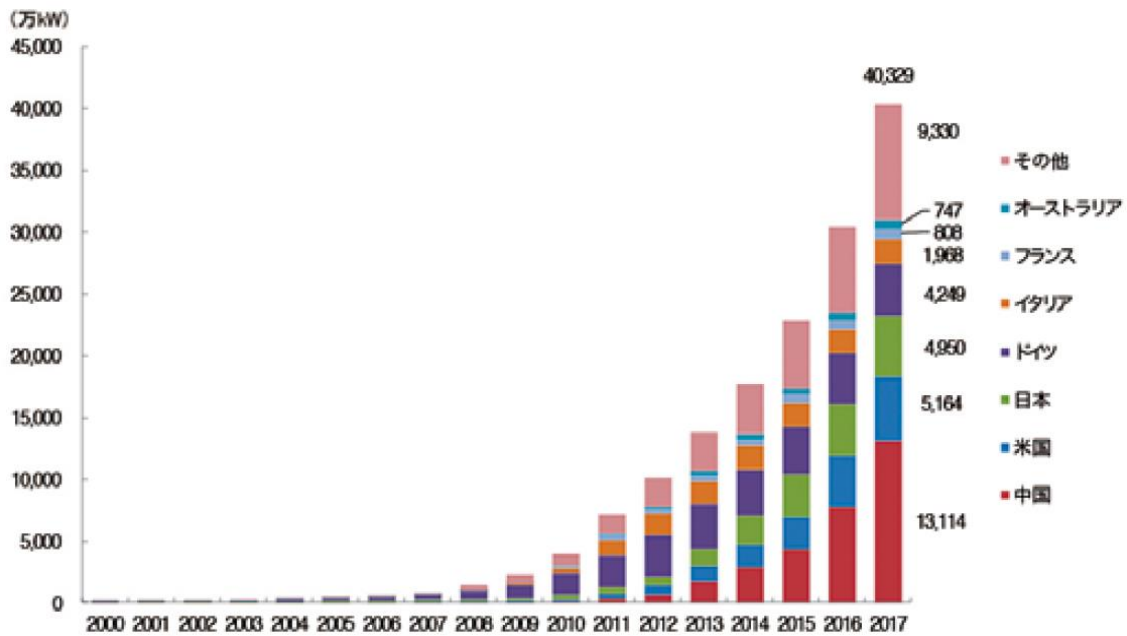


図 1.3 世界の太陽光発電の導入量[6].

1.2 太陽光エネルギーの利用技術

太陽光のエネルギーを利用する技術として、現在のところ次の 2 種類が実用的に用いられている。すなわち、太陽光のエネルギーを電力に変換する太陽光発電と、太陽光のエネルギーを熱に変換する太陽熱利用である。

1.2.1 太陽光発電

太陽光発電は、太陽電池を用いて太陽光のエネルギーを電力へと直接的に変換する発電方式である。可動部がなくメンテナンスコストが安いことや、発電中に騒音や振動、排煙などが出ないといった特長から、クリーンなエネルギーとして導入が年々拡大している。

最初の実用的な太陽電池は 1954 年に発表され、その発電効率は約 6 %であった[7]。その後、研究が進み、現在では図 1.4 に示すように様々な種類の太陽電池が開発されている。この多様な太陽電池のなかで、現時点で実用化が最も進んでいるのは単結晶シリコンと多結晶シリコンである[8]。これらを用いた太陽電池は住宅の屋根等に設置し発電を行う図 1.5 のようなソーラーパネルとして広く市販されており、その発電効率は理想的な運転条件下で 20 %程度である[9-13]。

さらに高い発電効率を実現しうる太陽電池として、多接合型太陽電池が挙げられる。多接合型太陽電池は、バンドギャップが互いに異なる複数の物質を基板上に積層することで太陽光をより効率よく電力に変換することを可能とした太陽電池である。一例を挙げると、InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池は多接合型太陽電池の一種であり、組成により多少異なるものの InGaP, InGaAs, Ge はそれぞれ約 1.8 eV, 1.3 eV, 0.7 eV のバンドギャップを持つ[14]。その結果、図 1.6 に示すように、1.12eV のバンドギャップのみを持つ[4]従来の結晶シリコン太陽電池に比べて幅広い波長領域の光を電力に変換することができ、結果としてより高い発電効率が得られる。研究レベルでは 40%を超える効率が報告されている[14]ほか、積層する化合物の数を増加させる等することで理論最高効率は約 86 %に達する[15]。さらに、一般に太陽電池は温度の上昇に伴い発電効率が低下するが、多接合太陽電池はその度合いが結晶シリコン等と比較して小さく、高温でも良好な発電特性をもつ[16]。多接合型太陽電池は製造プロセスが複雑なことや高額な材料を必要とする点から価格が高い[17]という課題は存在するものの、こうした様々な優れた特長により、理論最大効率が約 30 %とされる[4]従来のソーラーパネルに代わる新たな太陽電池として研究開発が進められている。

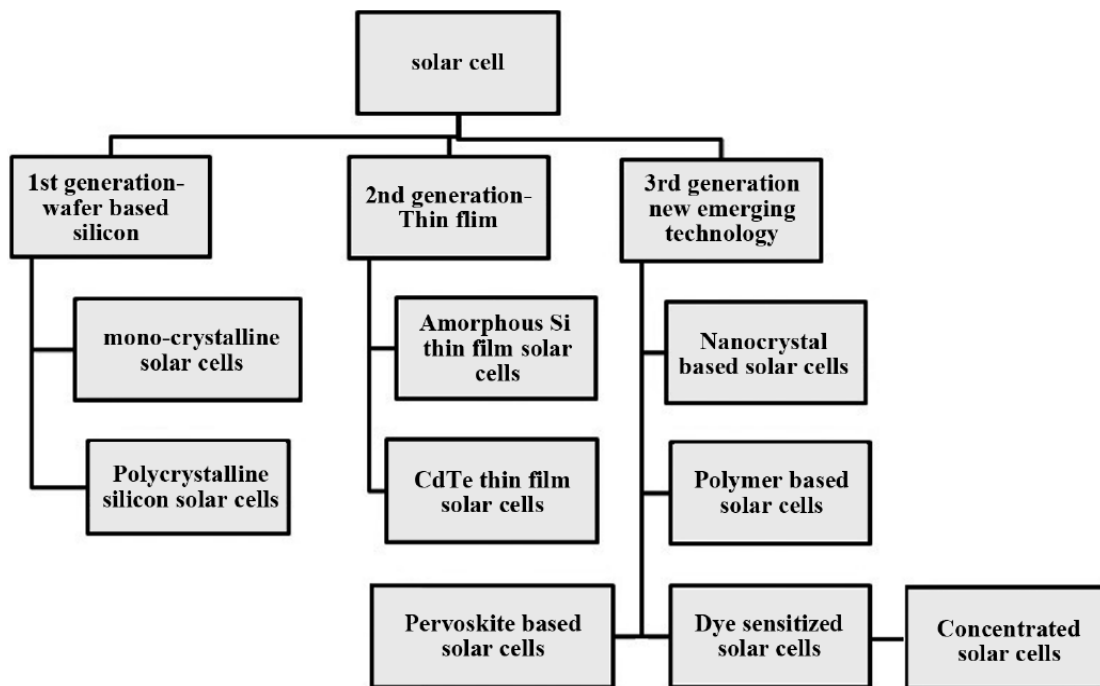


図 1.4 太陽電池の種類[18].



図 1.5 結晶シリコンを用いたソーラーパネルの例.

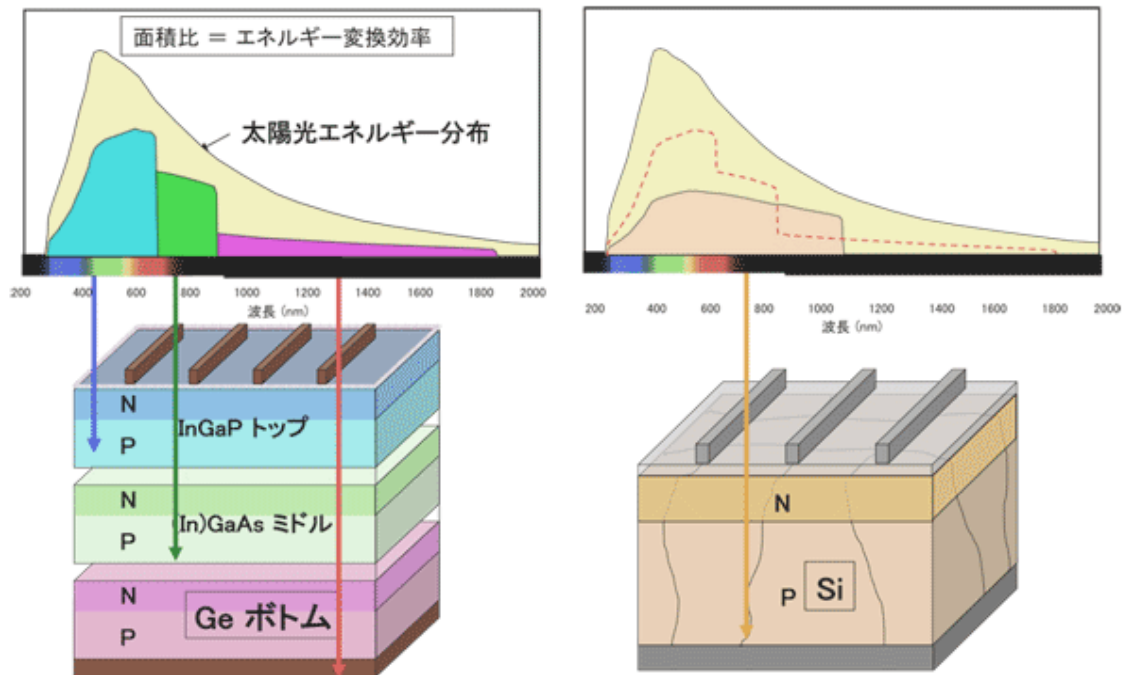


図 1.6 三接合型太陽電池の構造および結晶シリコン太陽電池との比較[17].

1.2.2 太陽熱利用

太陽熱利用は、集光器や集熱器等を用いて、太陽光のエネルギーを熱として回収し利用する技術である。回収した熱を用いて水を蒸発させ、タービンを回転させることにより火力発電と同様の発電を行う図 1.7 のような太陽熱発電や、図 1.8 に示す太陽熱温水器を用いることで水を加熱し、得られた熱水を給湯等の用途に直接的に利用する方式が実用化されている。

太陽熱発電では、レンズや反射鏡等を用いて太陽光を一点に集めることにより高温の熱を回収して発電を行う。発電効率の向上や夜間操業を可能とする蓄熱を行うための大規模な集熱システムを備えた太陽熱発電プロジェクトが世界の複数の箇所で進行しており、例えば米国ネバダ州の砂漠地帯では、高さ約 200 メートルの集熱タワーの周囲に 1 万枚以上の反射鏡を設置し(図 1.9)、タワーの先端に反射光を集中させることでタワー内部の熔融塩を加熱し蓄熱と発電を行う出力 110 MW の太陽熱発電所が存在する[19].

一方、太陽熱温水器等を用いて太陽熱を回収する方式は、一般住宅など小規模でも利用可能である。回収した熱は、従来の主用途である給湯のほか、近年ではデシカント除湿や吸収式冷凍機といった空調機器と組み合わせて利用する方式が研究されている[20-21]. 家庭やオフィスビルにおいて給湯や冷暖房によるエネルギー需要は無視しえない割合を占める(図 1.10 および図 1.11)ことから、これらの用途への太陽熱の利用の拡大は省エネに対する貢献が大きいものと期待される。

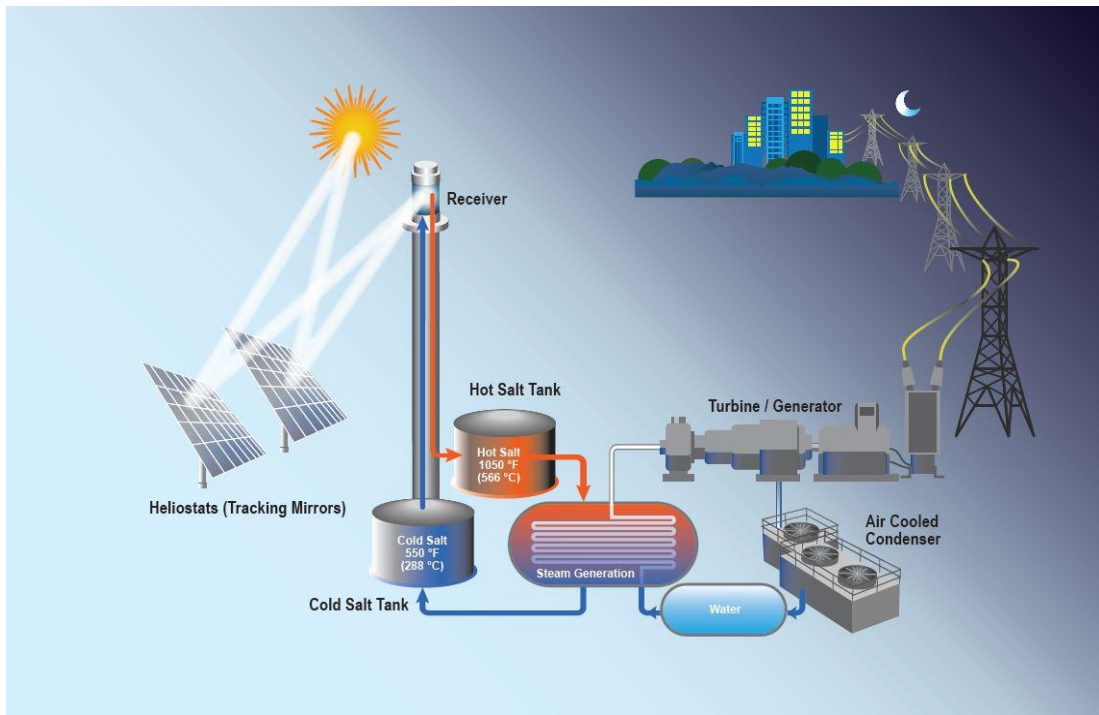


図 1.7 太陽熱発電の概略図[22].

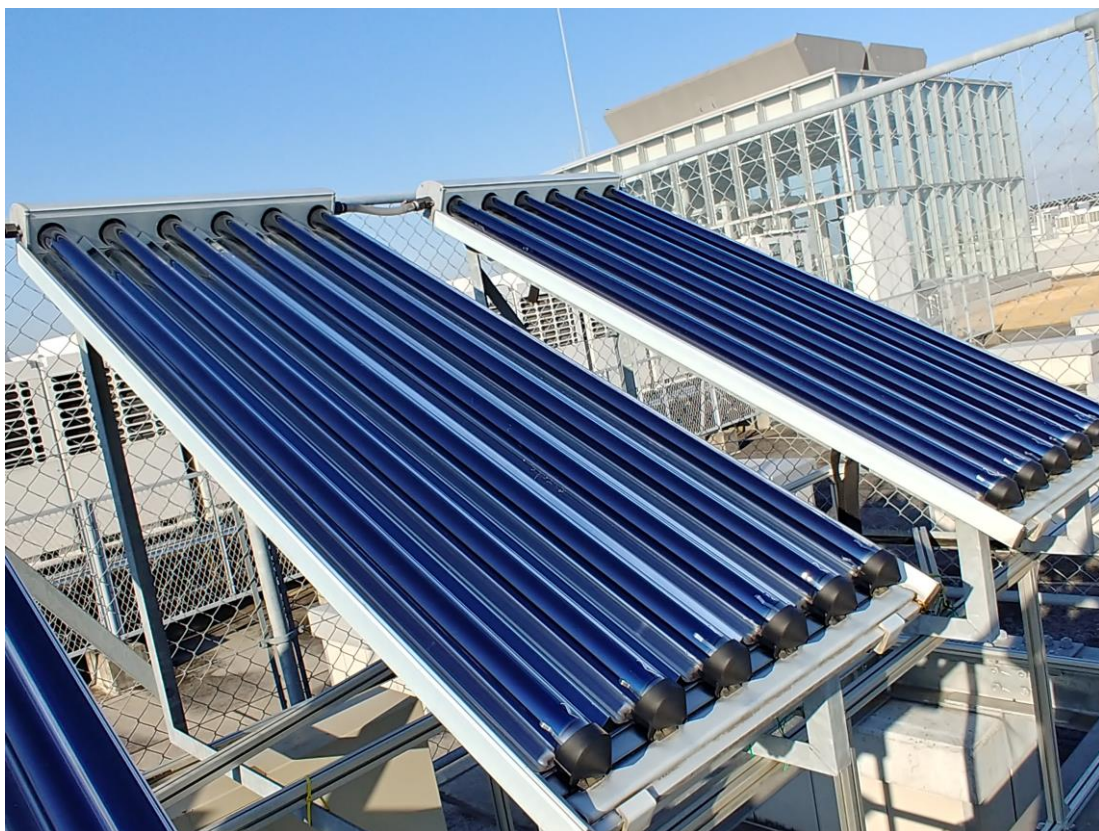


図 1.8 太陽熱温水器.



図 1.9 クレセントデューンズ太陽熱発電所の集熱器[22].

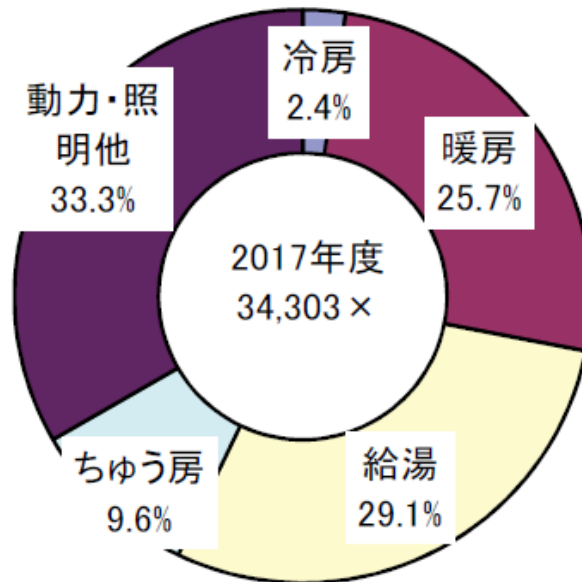


図 1.10 家庭における用途別エネルギー消費量割合[6].

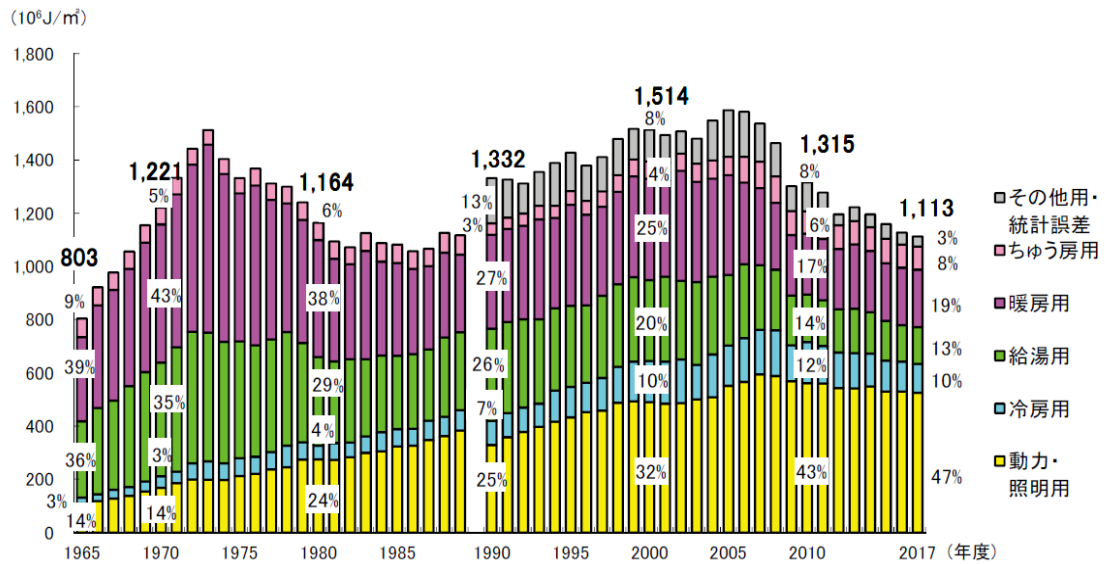


図 1.11 業務他部門における用途別エネルギー消費原単位の推移[6]. 業務他部門は、事務所・ビル、デパート、ホテル・旅館、劇場・娯楽場、学校、病院、卸・小売業、飲食店、その他サービス(福祉施設など)の9業種に大別される。

1.3 集光型太陽光発電・熱利用システム

集光器を用いることにより太陽光発電と太陽熱利用を同時に行い、太陽光エネルギーの総合利用効率を高める CPVT (Concentrated Photovoltaic and Thermal systems) と呼ばれる技術が近年盛んに研究されている。典型的な CPVT は集光器、太陽電池、冷却器、太陽追尾装置から構成され[23]、集光した光を太陽電池上に照射して電力を取り出し、同時に太陽電池を冷却器で冷却することで電池の過熱を防ぐとともに冷媒を通して熱回収を行う(図 1.12)。すなわち、CPVT では、集光器を用いることによって等量の太陽放射をより小さい太陽電池面積で得ることが可能となり、これは高価な太陽電池をより安価な集光器で置換することを意味する。CPVT の最大の利点はこの点にあり、集光の度合いをより高めることのできる集光器や冷却器の開発が、太陽光利用のコスト削減を進めるうえで有望なアプローチとなっている[23]。

CPVT の集光の度合いを表すパラメータとして集光倍率がある。集光倍率は焦点における光の放射照度と地上における自然太陽光の標準放射照度(1 kW/m^2)との比として定義され[24]、 n 倍の集光倍率とは焦点における光の標準状態での放射照度が $n \text{ kW/m}^2$ であることを意味する。CPVT では集光器としてフレネルレンズや平板反射鏡、放物面トラフ集光器、回転放物面集光器などが利用されるが、これらを用いた CPVT はその集光倍率の程度によって概ね三種類、すなわち、①低倍率(1-40 倍)CPVT、②中倍率(40-300 倍)CPVT、③高倍率(300 倍以上)CPVT に分類される[25]。とりわけ放物面集光器を用いた CPVT では高い集光倍率が得られ、その熱力学的な理論最大集光倍率は数万倍にも及ぶとされる[23]。ただし、高い集光倍率は焦点に設置した太陽電池に対する大きい熱負荷をも意味し(図 1.13)、この冷却が容易ではないことから、放物面集光器を用いて行われた研究は集光倍率数百倍のものがいくつか存在する([26]など)程度であり、CPVT に関する従来の研究の多くは中倍率以下のものである。例えば、Mohsenzadeh ら(2015)[27]はステンレス平板を反射鏡とする集光倍率 1.2 倍の CPVT を構築し(図 1.14)、水冷式の冷却器と単結晶シリコン太陽電池を用いて発電と集熱を行い発電効率 11.9%、集熱効率 62.98%という結果を得た。また、Coventry (2005)[28]は、図 1.15 に示す放物面トラフ型集光器を用いて太陽光を線状に集光する集光倍率 37 倍の CPVT を構築し、単結晶シリコン太陽電池と水冷式の冷却器を用いて発電と集熱を行い発電効率 11%、集熱効率 58%という結果を得た。これらも含めた代表的な先行研究の結果を表 1.1 にまとめて示す。

上に述べた通り、放物面集光器を用いた高倍率 CPVT では大きい熱負荷にさらされる太陽電池の冷却が課題となっている。一方、集光倍率の向上を妨げているこの熱負荷は、仮に伝熱性能が十分に高い熱交換器を開発することができれば、一転して利用価値の高い高温の熱源となりうる。本研究では、温度上昇に伴う発電効率の低下が比較的小さいという三接合型太陽電池の特長と水の持つ潜熱の大きさに着目し、気液二相流の安定的な流動を可能とする放射拡張流路型熱交換器を用いて熱交換器内で水を沸騰させることにより潜熱で太陽電池を冷却し、熱源としての利用価値の高い高温の水蒸気と熱水の回収と三接合型太

陽電池による高効率での発電を両立する放物面集光型 CPVT によるコージェネレーションシステムの実現を目指す。

表 1.1 CPVT に関する従来の研究.

番号	集光器	太陽電池の種類	発電効率	集熱効率	総合効率	著者
1	放物面 トラフ	単結晶 Si	11 %	58 %	69 %	Coventry (2005) [28]
2	放物面 トラフ	GaAs	8.9 %	41.7 %	50.6 %	Li ら (2011) [29]
3	放物面 トラフ	単結晶 Si	6.4 %	45 %	51.4 %	Bernardo ら (2011) [30]
4	放物面 トラフ	単結晶 Si	10 %	16 %	26 %	Chaabane ら (2013) [31]
5	平板 反射鏡	単結晶 Si	11.9 %	63.0 %	74.9 %	Mohsenzadeh ら (2015) [27]
6	フレネル レンズ	GaAs	18 %	45 %	63 %	Feng ら (2016) [32]
7	フレネル レンズ	InGaP/InGaAs/ Ge	28 %	60 %	88 %	Xu ら (2016) [33]
8	放物面 トラフ	GaAs	8 %	37 %	45 %	Widyolar ら (2017) [34]
9	回転 放物面	InGaP/InGaAs/ Ge	28.6 %	54.5 %	83.1 %	Wang ら (2019) [26]

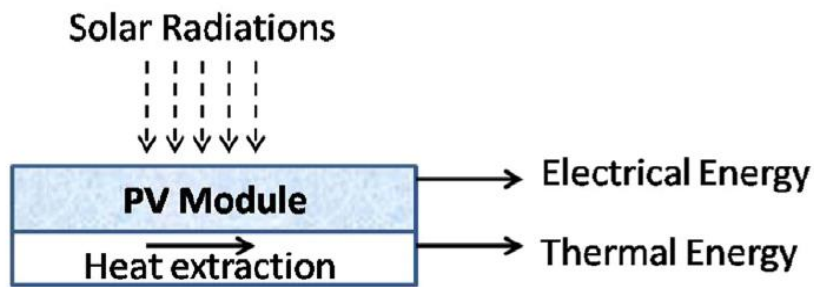


図 1.12 CPVT の概要[35]. CPVT では, 太陽光を太陽電池上に集光して発電を行って電力を得ると同時に, 太陽電池を冷却するための熱交換器を利用して熱回収を行う.

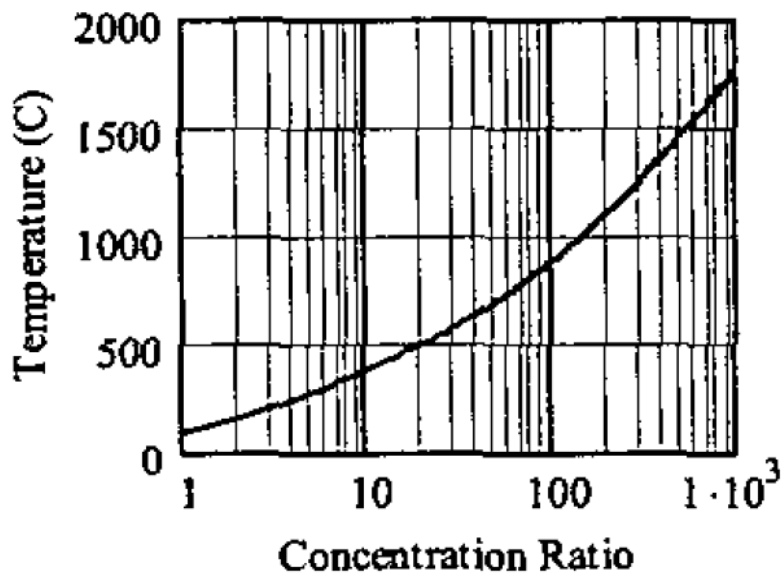


図 1.13 冷却器を用いずに太陽電池に集光した場合の, 集光倍率と太陽電池の温度[36]. 集光倍率が 500 倍のとき, 冷却しなければ電池は 1400 °Cに達する. このような大きい熱負荷が, 集光倍率を高めるうえでの課題のひとつとなっている.

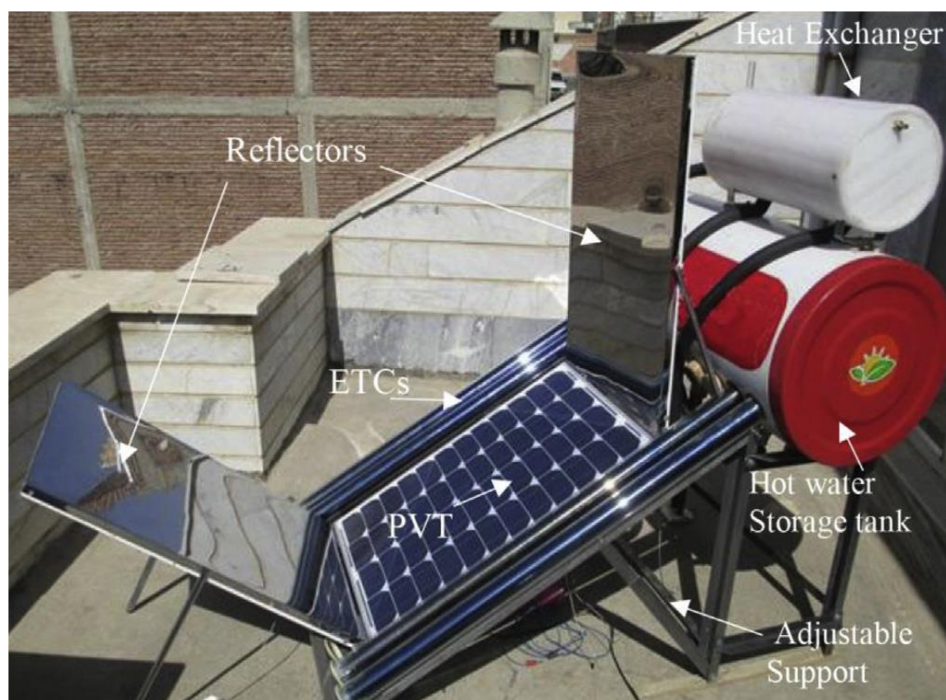


図 1.14 Mohsenzadeh らが用いた CPVT[27]. 2 枚のステンレス平板からなる反射鏡で太陽電池に集光し、この電池を水で冷却する.



図 1.15 Coventry が用いた CPVT[28]. 放物線を断面形状とする反射鏡を用いた、集光倍率 37 倍のシステムである.

1.4 本研究の目的

本研究は、回転放物面集光器と三接合型太陽電池を用いた CPVT において、集光倍率数百倍の下で放射拡張流路型熱交換器を用いた気液二相流による安定的な冷却によって発電が可能であることを実証し、また、100°C程度の水蒸気と熱水の回収と三接合型太陽電池による高効率での発電を同時に行うコージェネレーションシステムを実現することを目的とする。

第 2 章 研究の方法

2.1 研究の手順

前述の通り，本研究の目的は放射拡張流路型熱交換器と回転放物面集光器および三接合型太陽電池を用いた CPVT において高効率の発電と 100°C 程度の水蒸気と熱水を回収する太陽熱利用を両立するコージェネレーションシステムを実現することである．これを実現するにあたり，まず，東京大学柏キャンパス環境棟屋上において以下に示す実験装置を組み上げる．次に，集光器の精度や集光倍率等を確認するための集熱実験および太陽電池の性能を確認するための発電効率測定を行う．これらの結果を踏まえて最後に発電と集熱を同時に行い，システムとしての性能を評価する．

2.2 実験に用いる CPVT および各機器の概要

本研究では，放物面集光器，太陽追尾装置，InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池，熱交換器の 4 要素およびこれらを機能させるための機器からなる CPVT を構築する．システム全体の写真を図 2.1 に示す．また，各装置の概要を以下に順に記す．



図 2.1 本研究で用いる CPVT の全体像(環境棟屋上).

2.2.1 放物面集光器

本研究の CPVT の中心に位置するのが、回転放物面集光器である。回転放物面集光器は、その軸に平行に入射した光がその焦点に集まる放物面の性質を利用した集光器であり(図 2.2)、本研究では図 2.3 に示す直径 2 m、焦点距離 1.3 m の回転放物面集光器を用いる。この集光器は金属製の放物曲面の表面に反射率の高いフィルムを貼った構造をしており、その焦点は直径約 2 cm の円形と推定される(これは実験とシミュレーションの結果をもとに推定した値であり、詳細は第 3 章に記す)。すなわち、その幾何学的な集光倍率は約 10000 倍であり、反射率やその他損失等を考慮した実際の集光倍率も 5000 倍以上に達する。この集光倍率では冷却がきわめて困難であるため、太陽電池を用いて発電を行う際には太陽電池を焦点から数 cm 後方へ離し、太陽電池上において集光倍率が 1000 倍になるように調整するものとする。

集光倍率を考えるうえでは集光器の反射率も重要なパラメータとなる。CPVT に関する多くの研究で反射面の反射率として 90 %以上の値が仮定されている[37-40 など]が、本研究で用いる集光器は屋外に設置され長期間にわたって風雨にさらされることから、鏡の汚れ等により反射率が低下する可能性がある。そこで、TENMARS 社製の太陽光放射照度計(TM-206)とレーザーポインターを用いて、レーザーポインターから照射され放射照度計に直接入った光の放射照度と、レーザーポインターから照射され集光器の表面で反射し放射照度計に入った光の放射照度とを計測し、これらを比較することにより反射率を推定する実験を行った(図 2.4)。

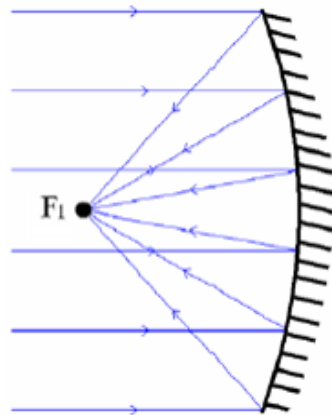


図 2.2 放物面集光器の集光の原理[41]. 放物面集光器は, 平行に入射した光が焦点に集まる性質を利用している.

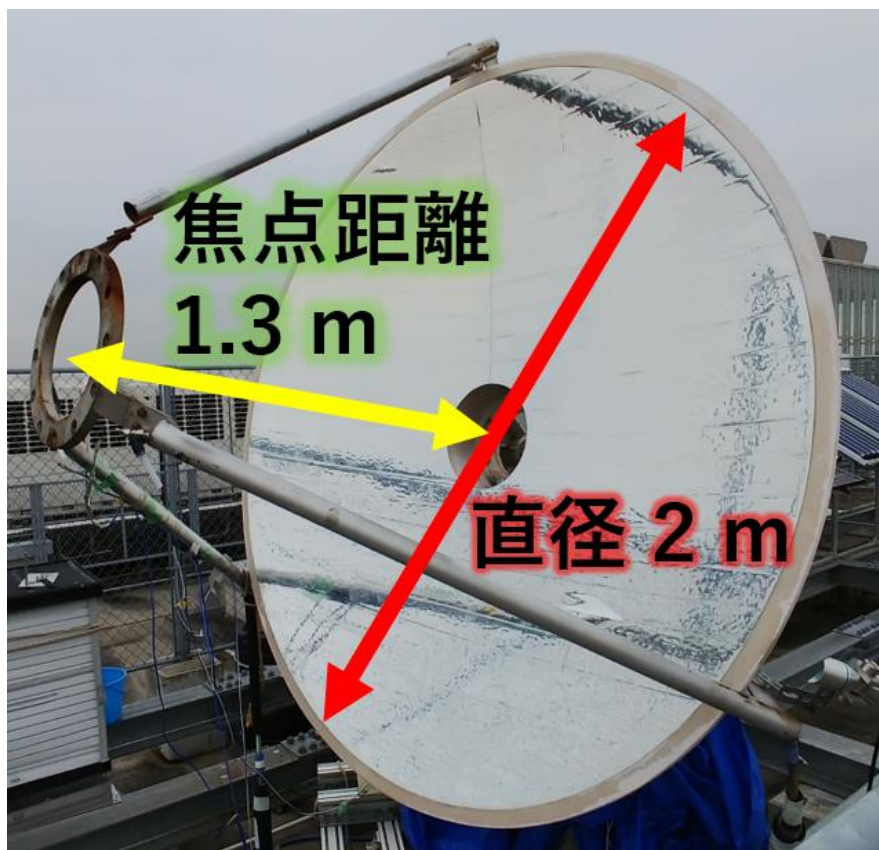


図 2.3 本研究で用いる放物面集光器. その直径は 2 m, 焦点距離は 1.3 m であり, 焦点における実質の集光倍率は 5000 倍を超える.

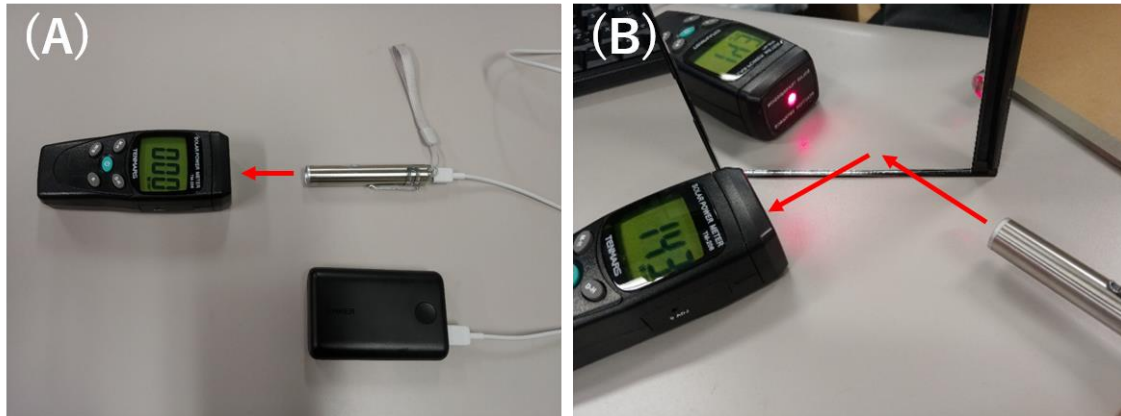


図 2.4 反射率の測定方法. まず, (A)のようにレーザーポインターの光を放射照度計に直接入射させる. 次に, (B)のようにレーザーポインターの光を反射面に当て, 反射光を放射照度計に入射させる. 両者の測定値の比から反射率を求める.

2.2.2 太陽追尾装置

放物面集光器によって焦点に光を集めることができるのは, 入射光が放物面の軸に平行であるときのみである. すなわち, 放物面で集光するのであれば, 時々刻々とその位置を変える太陽と放物面を常に正対させなければならない. この操作は, 放物面集光器の上部に取り付けられた光センサ(図 2.5)を用いて自動制御により行う. 放物面集光器の制御システムには集光器の位置情報(GPS)が登録されており, 自動制御モードが開始されると, まず, この位置情報と現在時刻をもとに太陽の理論位置を計算し, その方位角・高度角へ放物面集光器が回転する. この回転は集光器の下部に取り付けられたモーター(図 2.6)によって行われる. この回転により理論位置について以降は, 光センサで検知された入射光の角度と理論角度との誤差が 0.0253° を超える度に集光器の角度を微調整することにより太陽を追尾し続ける.



図 2.5 太陽追尾に用いる光センサ(集光器上部, 赤枠内).



図 2.6 放物面集光器の回転のためのモーター.

2.2.3 InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池

本研究では、InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池を用いて発電を行う。この種の太陽電池の特長は第1章で述べた通りである。実物の写真を図2.7に示す。本研究では、まず、この太陽電池の性能の確認のため、集光しない自然太陽光の下での発電効率測定を実施する。この測定の回路等を図2.8に示す。この測定では、太陽電池と電圧計(日置電機 LR8400)、電流計(日置電機製 CT6700)、可変抵抗器を接続し、抵抗値を徐々に変化させながら電流と電圧を0.05秒ごとにデータロガー(日置電機 LR8400)に記録し、電池の電流・電圧特性を調べる。データロガーには全天日射計(Hukseflux CHF-SR11)と熱電対も接続し、太陽電池上における太陽光放射照度と太陽電池の温度を同様に記録する。上記測定は40℃から80℃まで10℃ごとに、太陽電池をヒーターでゆっくりと加熱しながら実施した。

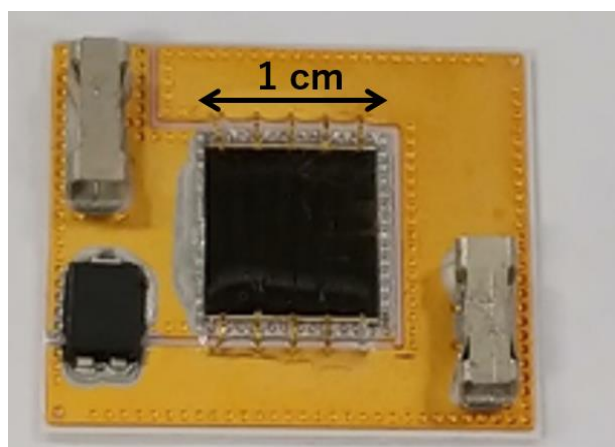


図 2.7 用いる InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池.

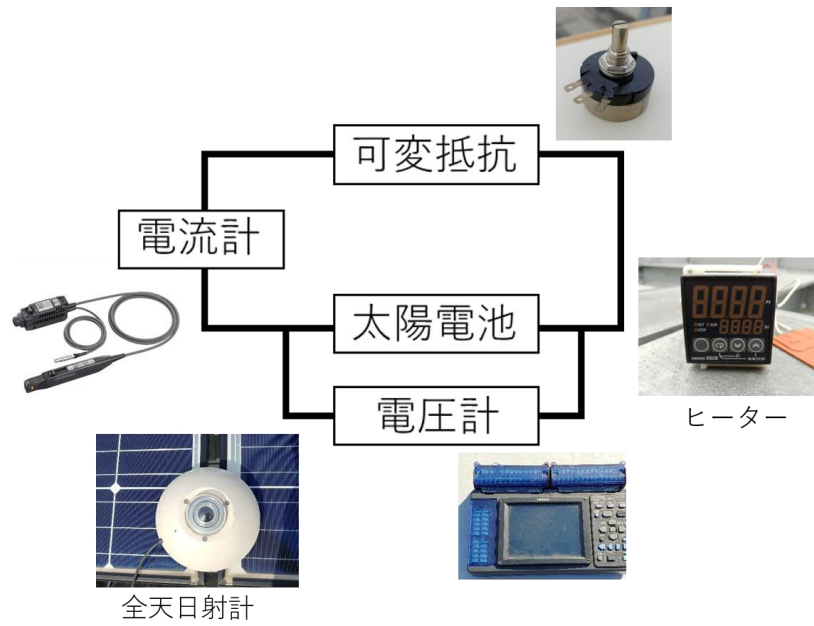


図 2.8 太陽電池の発電効率の測定に用いる回路と装置.

2.2.4 熱交換器

CPVTにおいて集光器と並び重要な役割を担うのが熱交換器である。数百倍程度の高い集光倍率を目指す本研究において、数百 kW/m^2 の熱負荷のもとで太陽電池を安定的に冷却できる高性能な熱交換器の存在が不可欠である。本研究では、水が蒸発する際の潜熱の大きさに着目し、熱交換器内で水を蒸発させることで高い熱伝達率を得るとともに熱源として利用価値の高い $100\text{ }^\circ\text{C}$ 程度の気液二相流を流出させる冷却系の実現を目指し、近年新たに開発された、安定的な二相流の流動が得られる放射拡張流路型熱交換器[42]を利用することとする。

高集光倍率 CPVT において太陽電池の冷却を考える際、熱交換器の性能だけでなく、太陽電池と熱交換器との接着方法についても十分に注意を払わなければならない。集光器で集められた光はまず太陽電池に照射され、太陽電池においてそのエネルギーが電力や熱に変わり、その熱が熱交換器に伝わってはじめて太陽電池の冷却が実現される(図 2.9)。すなわち、太陽電池と熱交換器との間の接合部分の伝熱性能が十分に確保されなければ、どれほど優れた熱交換器を用意しても太陽電池の冷却は不可能である。

集光倍率 q 倍の光が太陽電池に照射され、この太陽電池が接合部を介して熱交換器によって冷却されているとき(図 2.10)、仮に太陽電池と熱交換器との間の接合が完全で理想的な伝熱状態が達成されているとすれば、定常状態における太陽電池表面温度 T_{cell} と熱交換器温度 T_{HE} との間には、

$$T_{\text{cell}} - T_{\text{HE}} = q \left(\frac{L_{\text{cell}}}{\lambda_{\text{cell}}} + \frac{L_a}{\lambda_a} \right) \quad (1)$$

で表される温度差が存在する。ただし、 λ_{cell} と λ_a はそれぞれ太陽電池と接合部の熱伝導率であり、 L_{cell} と L_a はそれぞれ太陽電池と接合部の厚さである。式(1)に示される通り、太陽電池と熱交換器との温度差は太陽電池自身の熱抵抗と接合部の熱抵抗の影響を受ける。沸騰熱伝導により熱交換器の温度が $100\text{ }^\circ\text{C}$ 程度で一定であるとき、太陽電池の温度を可能な限り下げするためには、両者の接合部の熱伝導率を可能な限り大きく、かつ接合部の厚さを可能な限り小さくしたうえで(太陽電池の熱抵抗そのものを小さくするのは難しい)、実際の伝熱条件を式(1)に近づけるため可能な限り接触熱抵抗が小さくなるような接合方法をとらねばならない。

このような制約のもとで太陽電池を熱交換器に接合する最も簡単な方法として、熱伝導性のテープやグリースの使用が考えられる。本研究では、当初、高熱伝導率のグリース(AINEX 製 JP-DX1)を用いる方法を採用したが、数百倍程度の集光倍率で試験したところ伝熱が不十分で電池が焼ける結果となった(図 2.11)。そこで、熱交換器と太陽電池とをハンダ付けにより接着する方針を採る。ただし、通常のはんだを使用するとその高温により太陽電池の基板にはんだ付けされている端子類のはんだが融けるという問題や熱による発電素子そのものの破損の可能性が生じるため、はんだの中でも特に低い融点をもつ Bi58Sn42(融点 139°C [43]、図 2.12)を用い、 150°C 以下の温度のもとではんだ付けを実施した。

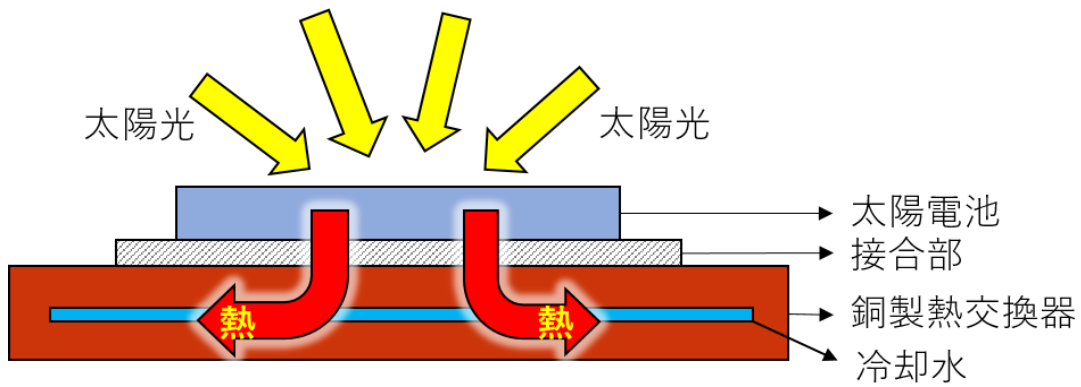


図 2.9 太陽電池の冷却の様子.

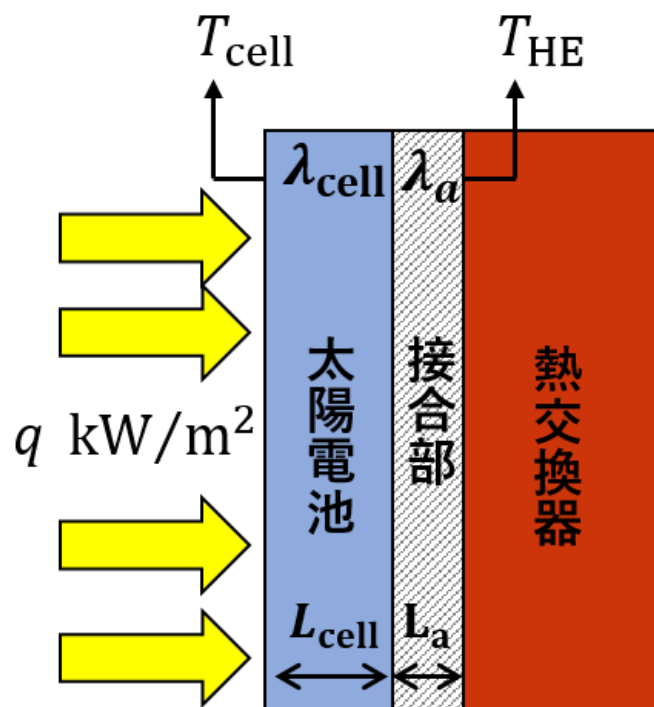


図 2.10 理想的な伝熱条件における太陽電池の冷却. 集光倍率が q 倍のとき, 太陽電池表面と熱交換器との間の温度差は式(1)により表される.



図 2.11 熱交換器との間の伝熱性能が不十分であったために焼損した太陽電池.



図 2.12 太陽電池と熱交換器とのはんだ付けに用いた Bi58Sn42 のはんだ棒. このはんだの融点は $139\text{ }^{\circ}\text{C}$ と, JIS 規格品のはんだでも特に低い値をとる.

2.2.5 その他の装置

(1) 直達日射計

地表に降り注ぐ太陽日射には、大気を透過して地表に直接到達する直達日射と、大気中の水蒸気やエアロゾルなどで反射、散乱されて天空の全方向から入射する散乱日射とがあり(図 2.13)、この両者をあわせて全天日射と呼ぶ[44]。本研究では、特に断らない限り、直達日射と直交する平面において測定される直達日射量と散乱日射量の和を全天日射量と定義する(文献によっては、直達日射量を水平面上の値に換算し、水平面上で測定した散乱日射量とあわせて全天日射量を定義する場合があるが、本研究ではすべて直達日射に対して垂直な平面を基準とする)。

放物面はその軸に平行に入射する光を焦点に集める。すなわち、放物面集光器を用いた CPVT では、太陽日射のうち直達日射が集光される。したがって、CPVT による発電効率や集熱効率の計算(後述)にあたっては集光器に入射する直達日射量を把握する必要がある。このために用いられるのが、図 2.14 に示す直達日射計(英弘精機 MS-57)である。この直達日射計は図 2.15 のように放物面集光器に放物面の軸と平行になるように固定されており、太陽を追尾する集光器の動きに直達日射計も追随する。

(2) 冷却水の循環

本研究では冷媒として水を用いる。水はタンクに貯められ、ここからポンプ(イワキ MDG-M4)によって系を循環する。水の流量はポンプの出力をインバータ(三菱電機 FR-S510SE)で増減させることによって制御する。タンクを出た水は流量計(OVAL CoriMate II)を経て熱交換器に流入し、ここで太陽電池からの熱を受け取る。熱交換器から出た水は、必要に応じてラジエータ(デンソー WH33-R)において外気との熱交換を通じて冷却されたうえでタンクに戻される。熱交換器の直前と直後には熱電対が設置され、冷却水の温度変化と流量の測定値をもとに集熱量を求める。冷却システムの全体像を図 2.16 に示す。また、ここまでに述べた各測定機器の精度等を表 2.1 にまとめる。

表 2.1 用いた測定機器の性能等の一覧。

測定機器	型番	メーカー	測定レンジ	精度
放射照度計	TM-206	TENMARS	0 ~ 1999 W/m ²	±5 %
電圧計	LR8400	日置電機	-10 ~ 10 V	±0.1 %
電流計	CT6700	日置電機	0 ~ 5 A	±1 %
全天日射計	CHF-SR11	Hukseflux	0 ~ 3000 W/m ²	≤ 3.3 %
直達日射計	MS-57	英弘精機	0 ~ 4000 W/m ²	≤ 1 %
流量計	CoriMateII	OVAL	0 ~ 2700 g/min	±0.3 %

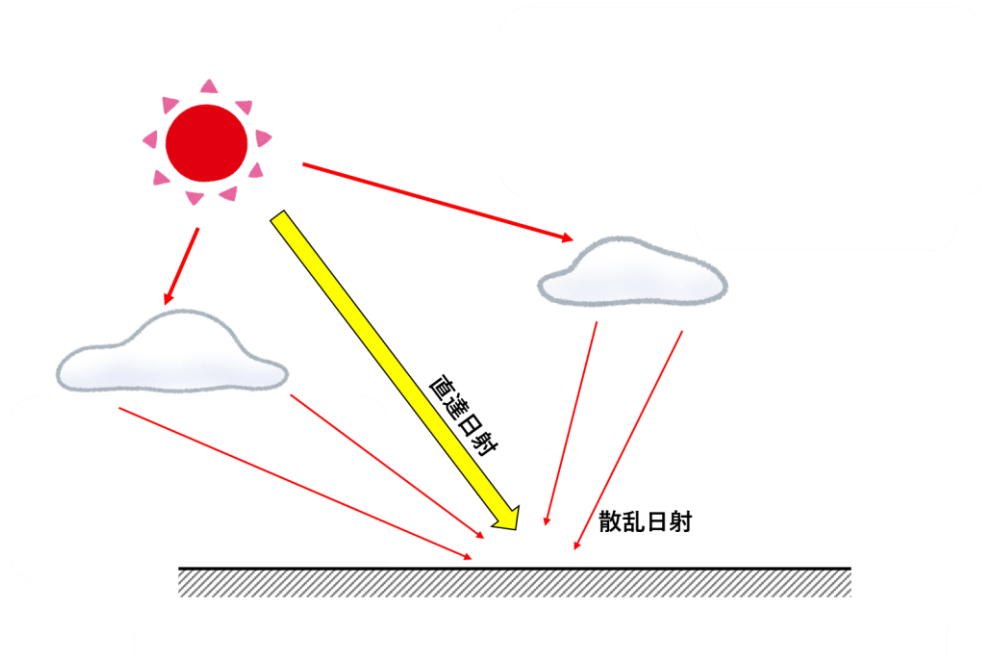


図 2.13 直達日射と散乱日射.



図 2.14 直達日射計.



図 2.15 集光器に固定された直達日射計.

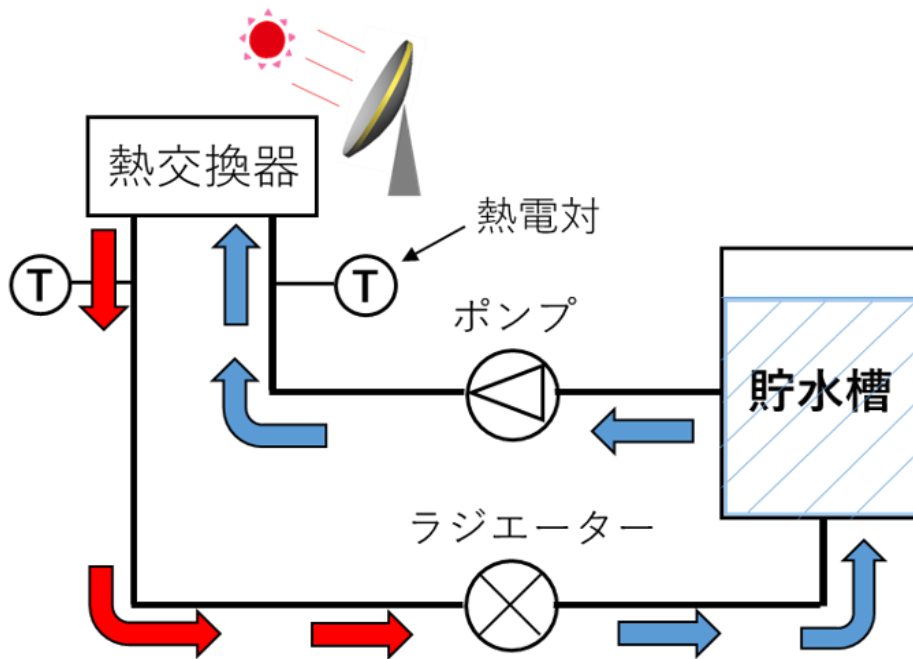


図 2.16 冷却システムの概要.

2.3 実験の方法

本研究で用いる放物面集光器には、その焦点の部分に円形の土台が備え付けられており、熱交換器はこの土台を利用して固定される。図 2.17 に、固定された熱交換器の写真を示す。また、図 2.18 に、熱交換器の中心付近を拡大した写真を示す。熱交換器は金属板を通じて集光器の土台に固定される。この金属板と熱交換器の距離はナットの高さを変えることで調整することができ、したがって熱交換器と放物面の焦点との距離も調整可能である。熱交換器には照射された光の反射を防ぐために黒体スプレー(イチネン TASC0 TA410KS)が塗られており、その放射率は 0.94(公称値)である。

図 2.19 は、図 2.17 や図 2.18 の反対側から撮影した熱交換器であり、冷却水の流路の様子が示されている。図の左側から伸びるのが熱交換器入口側流路であり、この流路を通して水が熱交換器の中央部分に流入する。熱交換器を通った水は熱交換器の上部と下部にそれぞれ設けられた 2 つの出口から出て、1 本の流路に合流して図の右側へ流出する。



図 2.17 熱交換器を集光器に固定した様子。

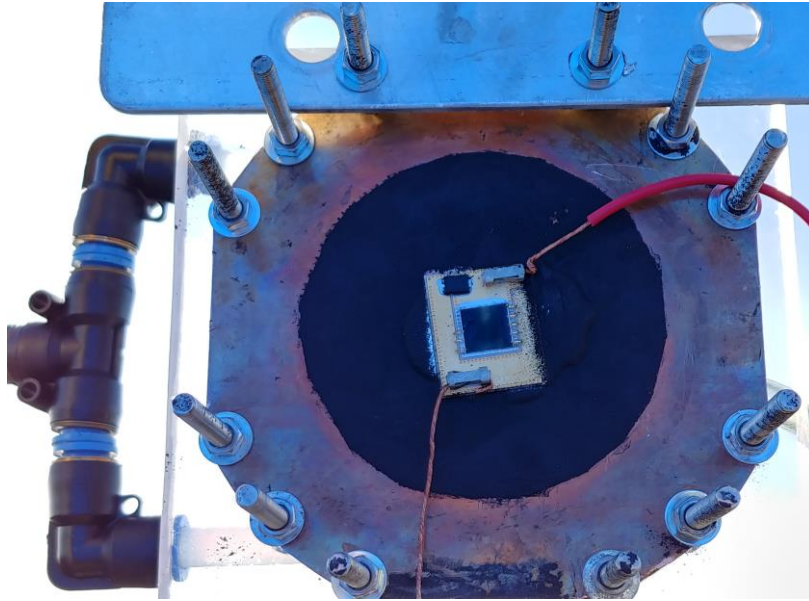


図 2.18 固定された熱交換器と太陽電池. 熱交換器に黒く塗られているのは, 熱交換器表面における光の反射を抑えるための黒体スプレーである.

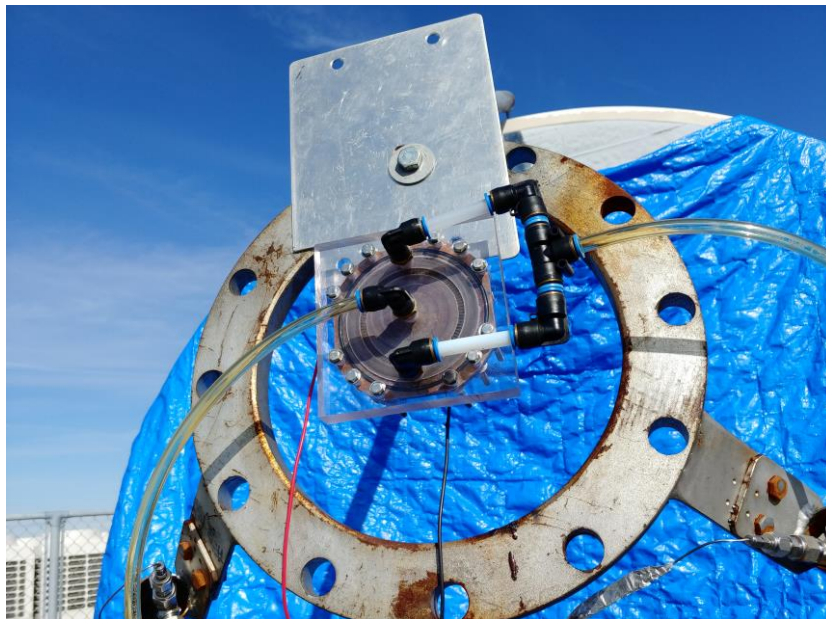


図 2.19 熱交換器に接続された流路.

2.4 発電と集熱の効率の評価方法

ここでは、上に記した測定機器により得られた測定値から発電効率や集熱効率を求める方法を述べる。

2.4.1 発電効率の評価方法

太陽電池の発電効率 η は

$$\eta = \frac{(IV)_{\max}}{\varphi A_{\text{cell}}} \quad (2)$$

で定義する。ただし、 I , V , φ , A_{cell} はそれぞれ太陽電池の電流、電圧、太陽電池に入射する光の放射照度、太陽電池の面積であり、 $(IV)_{\max}$ は測定された I と V の積の最大値とする。本研究では、InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池の性能を確認するためまずは集光しない自然太陽光の下での発電効率 η_{nonc} の測定を行い、然る後に集光した状態での発電効率 η_{con} を測定する。 η_{nonc} および η_{con} を求めるにあたっては、式(2)中の φ としてそれぞれ

$$\varphi = \varphi_{\text{tot}} \quad (3)$$

$$\varphi = C_r \varphi_{\text{std}} \quad (4)$$

を用いる。ただし、 φ_{tot} , C_r , φ_{std} はそれぞれ全天日射量、集光倍率、水平面での標準太陽放射照度(1 kW/m^2)を表す。 φ_{tot} は太陽電池と同じ平面上において全天日射計により測定された値を、 C_r は適宜求めた値を用いるものとし、また、 I および V はそれぞれ電流計、電圧計で測定された値を用いる。太陽電池の面積 A_{cell} は、用いる太陽電池の感光部が 1.0 cm 四方であることから、

$$A_{\text{cell}} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (5)$$

とする。

2.4.2 集熱効率の評価方法

CPVT の集熱効率 η_{th} は

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q}{\varphi_{\text{dir}} A_{\text{par}}} \quad (6)$$

で定義する。ただし、 Q , φ_{dir} , A_{par} はそれぞれ熱交換器での集熱量、直達日射量、集光器の集光面積である。直達日射量は直達日射計の測定値を用いる。集光面積は、放物面の形状から幾何学的に算出した値をもとに、熱交換器の影などの影響を考慮して求める。熱交換器での集熱量は、冷却水の温度上昇から

$$Q = \dot{m}c(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (7)$$

に従って求める。ここで、 \dot{m} , c , T_{out} , T_{in} はそれぞれ冷却水流量、水の比熱、熱交換器出口における水温、熱交換器入口における水温である。冷却水の流量と水温は流量計と熱交換器の前後に設置された熱電対による測定値を用いる。また、水の比熱は 4.2 J/gK とする。

集光器に入射した光は、その表面で反射して熱交換器に到達し、熱交換器の表面で反射

する一部を除き冷却水によって熱として回収される。したがって、理想的には、

$$Q = \gamma \varepsilon \varphi_{\text{dir}} A_{\text{par}} \quad (8)$$

が成り立つ。ただし、 γ , ε はそれぞれ集光器の反射率, 熱交換器の放射率であり, その値は, γ については上に述べた通り測定した値とし, ε は黒体スプレーの公称値から 0.94 とする。

第3章 実験結果と考察

3.1 放物面集光器の焦点の大きさの推定

焦点の大きさは放物面集光器を特徴付けるパラメータのひとつである。本研究では、本章で述べるあらゆる実験に先立ち焦点の大きさを推定するための実験を行った。以下に焦点の大きさの推定方法と実験結果を示す。

3.1.1 焦点の大きさの推定の原理

放物面集光器は、放物線

$$x^2 = 4fy \quad (9)$$

をその軸を中心に回転させて得られる回転放物面の形状をした集光器である。本研究で用いる放物面集光器は直径 2 m, 焦点距離 1.3 m であるから、放物面のもととなる放物線は

$$x^2 = 5.2y \quad (-1 \leq x \leq 1) \quad (10)$$

で表される。放物面に入射した直達光は、その表面で反射し、焦点を通過して無限遠へと直線的に進む。放物面の形状の対称性から、焦点からの距離が等しい限り、焦点の前方と後方で光の分布は等しい。

いま、この放物面集光器の焦点の半径が x m であるとする。焦点から後方へ l m 離れた位置における反射光の輪の半径を y m とするとき、焦点から前方へ l m 離れた位置における反射光の輪の半径も y m であり、これらの関係は図 3.1 のようになる。図で、幾何学的な考察から、

$$\tan \alpha = \frac{1-x}{1.3-\frac{1}{5.2}} = \frac{1-y}{1.3-\frac{1}{5.2}-l} \quad (11)$$

が成り立つ。これを x について解くと、

$$x = 1 - \frac{1.44(1-y)}{1.44 - 1.3l} \quad (12)$$

が得られる。すなわち、焦点の前後へある距離だけ離れた位置における光の分布域の半径を知ることができれば、式(12)に基づき焦点の半径を求めることが可能となる。本研究ではこの点に着目し、次項に述べるように、 y が特定の値になるような l を実験的に求めることによって焦点の大きさを推定する。

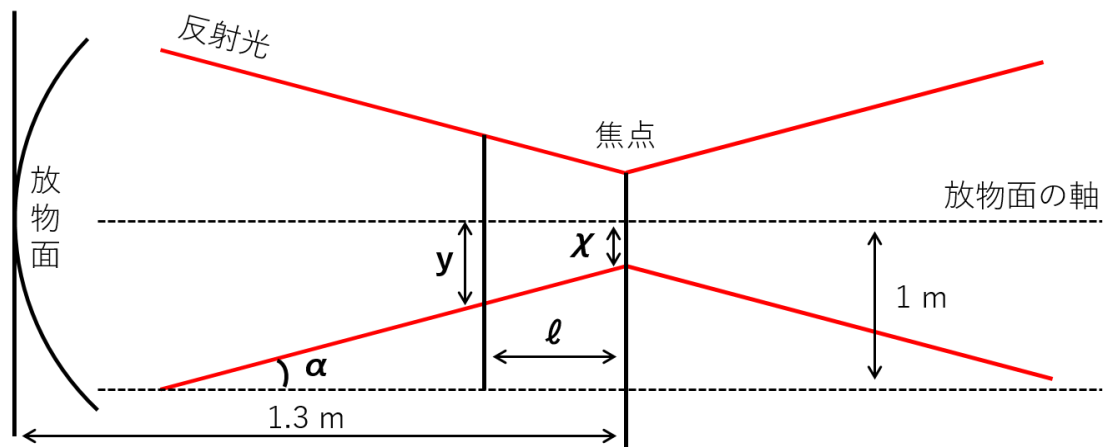


図 3.1 放物面で反射した光に関する幾何学的関係.

3.1.2 焦点の大きさの推定のための実験の方法

式(12)に含まれる未知数 l, y のうち, y の値を直接測定するのは難しい. 一方, l は距離であるから, 測定は比較的容易である. そこで, 実験では y をある値に固定し, この y を与えるような l を探すことによって x を求めることとする. 具体的には, 図 3.2 に示される 6 cm 四方の正方形熱交換器を集光器に設置し, 焦点と熱交換器との距離を変えながら集熱実験を行う.

正方形の形状をした熱交換器に集光されているとき, その光と熱交換器の間には, 図 3.3(A)~(C)に示される 3 通りの位置関係が考えられる. 熱交換器が集光器の焦点と同じ位置にある場合や焦点に十分に近い位置にある場合, 図 3.3(A)のように光はすべて熱交換器上に照射される. 一方, 熱交換器が焦点から十分に遠い位置にある場合, 光と熱交換器の形状が異なるために, 図 3.3(C)のように光の一部が熱交換器に収まらず外へ漏れ出す. 熱交換器を焦点に設置し, その位置を徐々に焦点の後方へと動かすと, 熱交換器上に照射される光の半径は徐々に大きくなり, ある位置で光の円が熱交換器に内接する図 3.3(B)の状態に達し, 以降は図 3.3(C)の状態となる. したがって, この熱交換器を焦点から様々な距離の位置に置いて集熱実験を行うと, 図 3.3(A)~(B)の状態にあるときは集熱量が変化せず, 焦点からある距離以上離れたとき図 3.3(C)の状態に転じ集熱量が減少しはじめる. この集熱量の減少が起こる位置を特定することによって, 式(12)中の l が定まり, 熱交換器が 6 cm 四方であるため $y=0.03$ として x を求めることが可能となる.

実験の様子を図 3.4 および図 3.5 に示す. 図 3.4 は図 3.2 の熱交換器を集光器に取り付けた様子であり, 図 3.5 はそれに集光しているときの様子である.



図 3.2 実験に用いる 6 cm 四方の銅製正方形熱交換器.

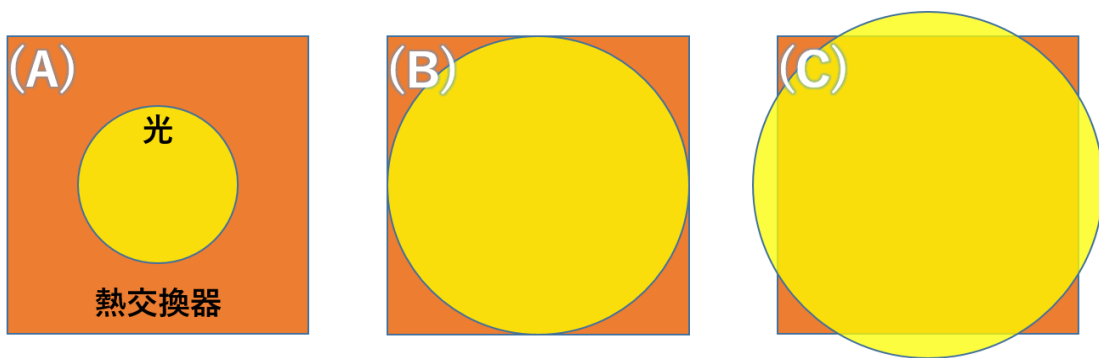


図 3.3 集光した光と熱交換器との位置関係.

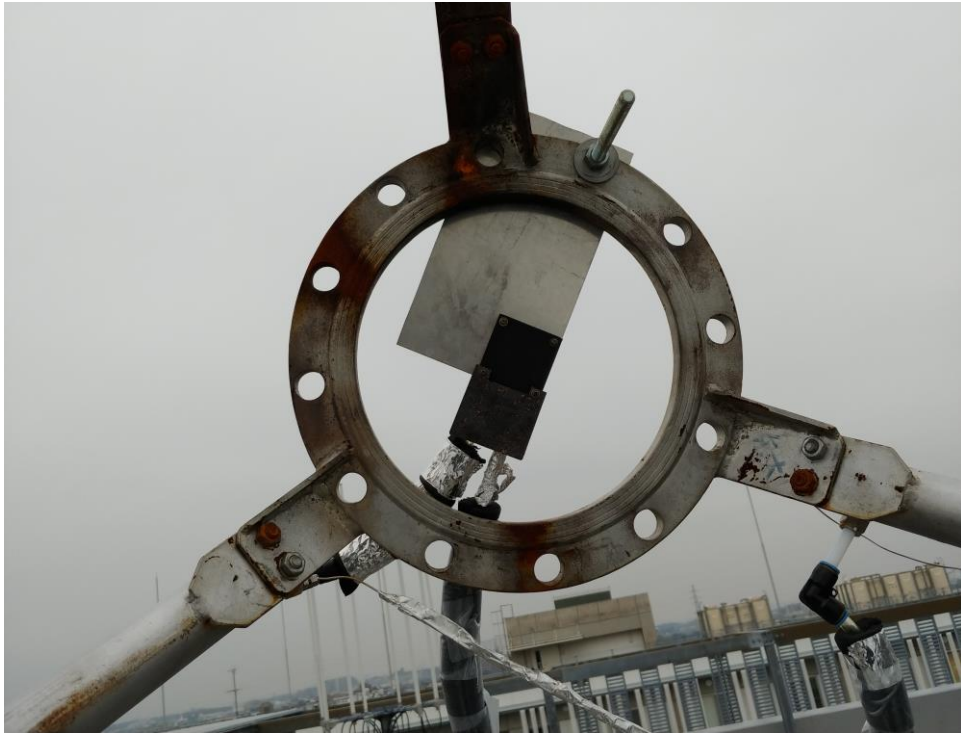


図 3.4 熱交換器を集光器に設置した様子.

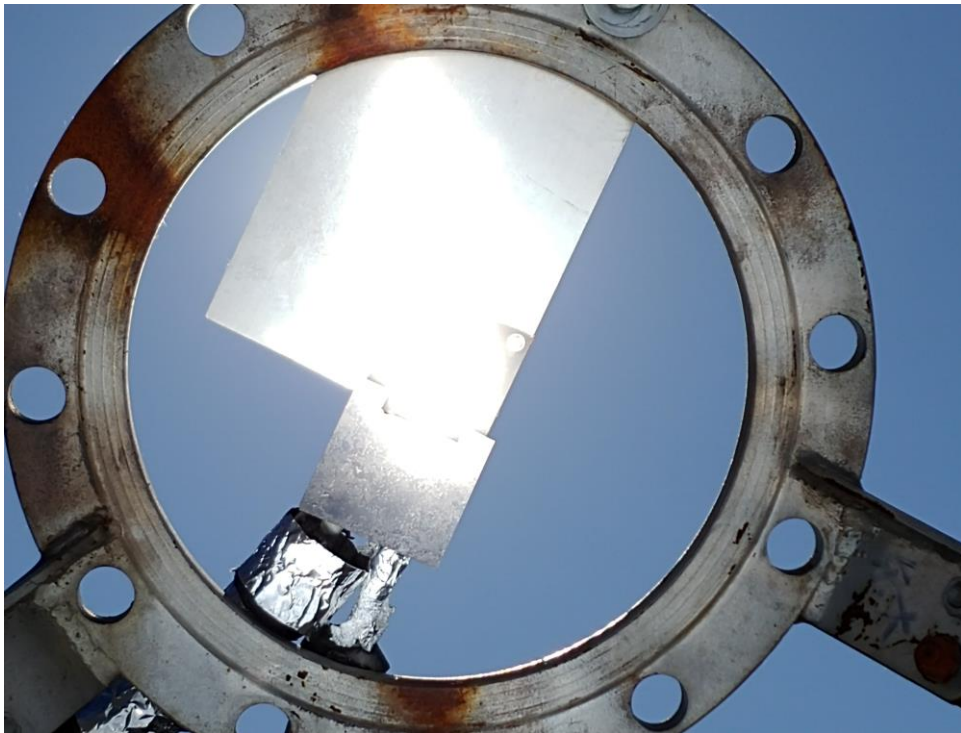


図 3.5 熱交換器に集光した様子. 白く光っている部分の中心に熱交換器が存在する.

3.1.3 焦点の大きさの推定のための実験の結果

実験は熱交換器と焦点との距離を 0 cm, 1cm, 2 cm, 2.5 cm, 3cm, 4cm として計 6 回実施し、式(7)に従って集熱量を求めた。この集熱量は式(8)で表されるように熱交換器への入射エネルギーに等しいと考えられ、それは直達日射量、集光器面積、集光器反射率、熱交換器放射率の積として与えられる。ここで、今回の実験では、全ての実験に対して同じ集光器、同じ熱交換器、同じ黒体スプレーを用いたことから、集光器面積、集光器反射率、熱交換器放射率はすべて同じ値を持つ。したがって、集熱量は直達日射量のみ関数となるから、実験によって得られた集熱量を直達日射量の測定値で割った値で結果を集計し、この値が減少し始める位置を探索するものとする。

実験結果を表 3.1 に示す。実験では、焦点からの距離が 0 cm から 2 cm のとき集熱量は変わらず、2.5 cm のとき集熱量が 0 cm のときと比較して 3 % 減少し、3 cm のとき集熱量が同じく 4% 減少した。この結果から、焦点から熱交換器までの距離が 2 cm 以下のとき光はすべて熱交換器に入射し、2.5 cm のときは光の一部が熱交換器から漏れ出ることが明らかとなった。

実験から、 $y = 0.03$ を与える l は $0.02 \leq l \leq 0.025$ の範囲に存在する。このことから、焦点の半径 x は、 $0.0076 \leq x \leq 0.01216$ と求められる。すなわち、焦点の直径は 1.52 cm 以上 2.432 cm 以下である。本研究では、この区間のほぼ中間に位置する 2 cm を焦点の直径とする。

表 3.1 焦点の大きさの推定のための実験の結果。

焦点からの距離 (cm)	熱回収量 (直達日射量あたり W)	0 cmの熱回収量に対する割合
0	1.21	1
1	1.20	1.00
2	1.23	1.01
2.5	1.17	0.97
3	1.16	0.96
4	1.07	0.88

3.1.4 実験結果の妥当性のシミュレーションによる検証

ここまで、実験により焦点の直径は約 2 cm であるとの結果が得られた。ここからは、直径 2 cm の焦点を持つ放物面集光器を仮定してシミュレーションを行い、その結果と実験結果とを比較し焦点の直径の推定値の妥当性を検証する。

シミュレーションでは、実験で用いたのと同じ直径 2 m、焦点距離 1.3 m の理想的な回転放物面をモデル化し、理想的には平行光である入射光に微小な角度をつけることで放物面の精度の粗さを再現する。これにより直径 2 cm の焦点を再現し、この条件で焦点から 1 cm、2 cm、2.5 cm、3 cm、4 cm の距離における光の様子を計算する。シミュレーションに関する詳細は第 4 章に記す。

焦点から 4 cm 後方における光の分布の様子を図 3.6 に示す。図 3.6(A)は、焦点から 4 cm の位置において光が分布する円形の領域の全体を示しており、図 3.6(B)は(A)の円形領域のうち 6 cm 四方の正方形で切り取られた内側のみを示している。図 3.6 から焦点の 4 cm 後方で光の一部が熱交換器から漏れる様子が読み取れるが、この 6 cm 四方の正方形に含まれる光のエネルギーの総和を、図 3.6(A)の領域全体に含まれる光のエネルギーの総和で割ったものを、前項の実験結果の「0 cm の熱回収量に対する割合」に対応させる。

焦点の直径を 2 cm と仮定した際のシミュレーションの結果を、実験結果と対応させる形で表 3.2 に示す。シミュレーションの結果と実験結果との誤差は最大でも 5 %以下であることから、焦点の直径が 2 cm であるという推定は妥当であると結論付けられる。

表 3.2 実験結果とシミュレーション結果との比較.

焦点からの距離 (cm)	0 cmの熱回収量に対する割合(実験値)	0 cmの熱回収量に対する割合(シミュレーション値)
0	1	1
1	1.00	1
2	1.01	1
2.5	0.97	0.99
3	0.96	0.97
4	0.88	0.84

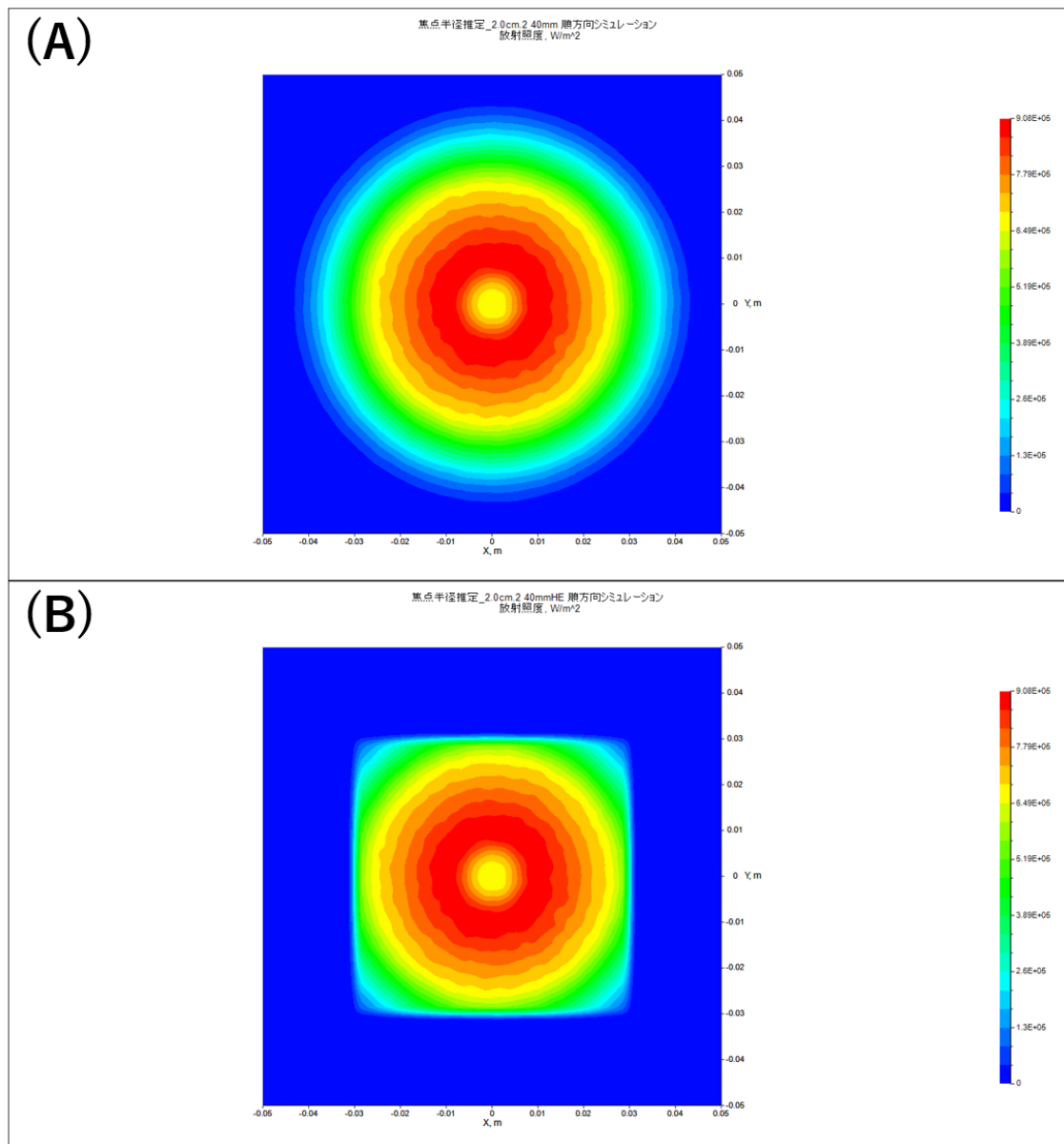


図 3.6 焦点から 4 cm 後方における光の分布のシミュレーション結果.

3.2 放物面集光器の反射率の測定結果

集光器の反射面の反射率は集光倍率に大きく影響するパラメータである。ここでは、第 2 章第 2 節第 1 項に述べた方法に基づき実施した反射率の測定の結果を示す。

反射率の測定にあたっては、図 3.7 のように集光器を①から⑨までの 9 つの区域に分割し、高所のため測定の難しい⑨を除く 8 つの区域について、ひとつの区域につき 12 点程度、集光器全体で合計 100 点を無作為に選び反射率の測定を行った。

区域ごとの反射率の測定結果を図 3.8 に示す。ここに示された反射率は、各区域内で個々の点で測定された値を平均したものである。また、各点において測定された反射率と全 100 点について平均した値は 77.3%であった。

上に述べた測定は反射面を水で洗った後に実施したものである。この測定の日、水で洗う前の反射面には塵のようなものが微かに付着していたが、この状態でも①～③の区域に対して参考として反射率を測定した。その結果を図 3.9 に示す。水洗の前後で反射率が変化するというこの結果から、屋外に設置され風雨にさらされる集光器の反射率は経年により低下する可能性があることが示唆された。以後、本研究では反射率として 77.3%の測定値を用いるが、この値の精度については留意しておかなければならない。

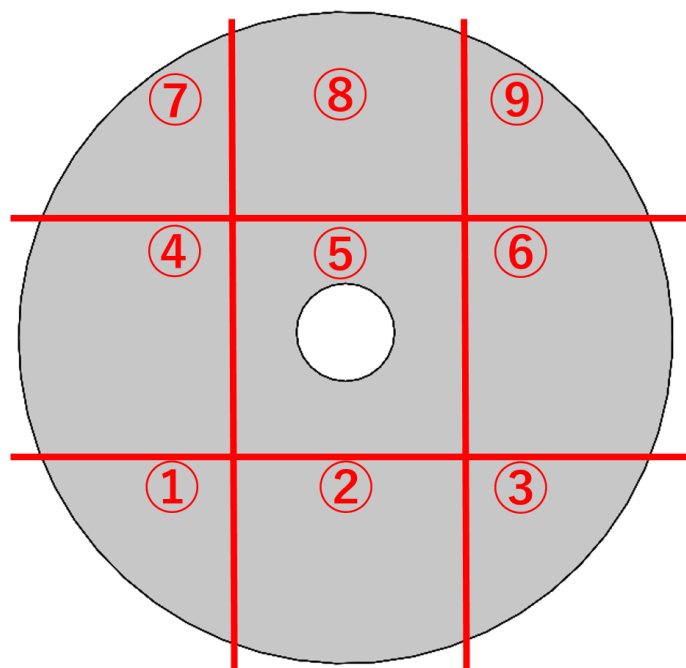


図 3.7 反射率の測定部分。測定にあたっては、放物面を九分割し、⑨を除く各区域から 12 点前後ずつ、計 100 点を無作為に選び反射率を測定した。

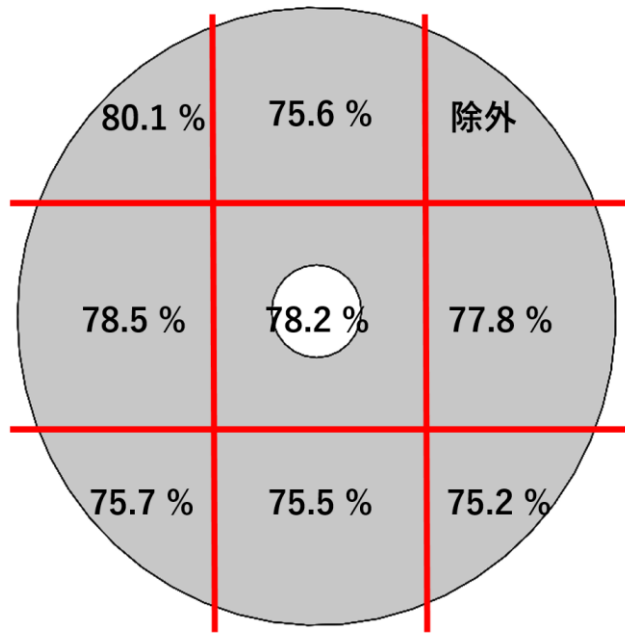


図 3.8 区域ごとの反射率の測定結果.

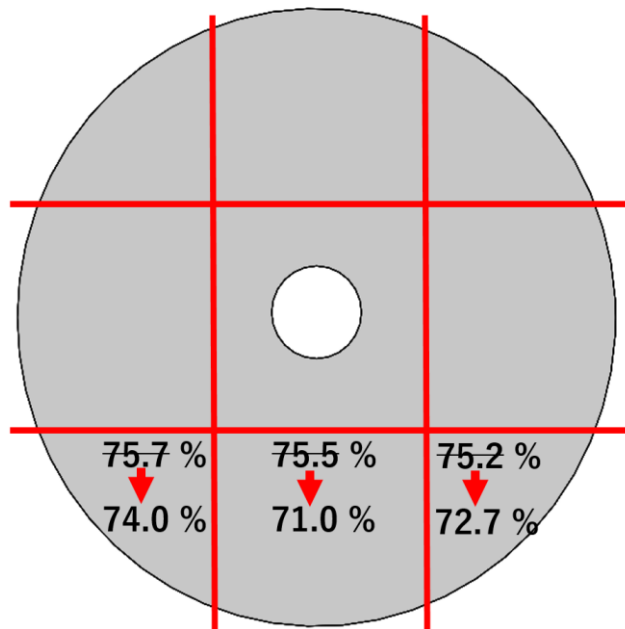


図 3.9 反射面に汚れが付着している場合の反射率の測定結果. 反射面を水洗した場合に比べ反射率の値が低くなっている.

3.3 InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池の発電効率測定

集光下での太陽電池の発電効率の測定に先立ち、基本的なデータとして、集光しない自然太陽光(750 W/m^2)のもとでの太陽電池の発電効率を測定した。その結果を図 3.10 に示す。図中の実線で示されているのが実測された部分であり、破線で示された 90°C 以降の値は 70°C と 80°C の測定結果をもとに直線的に外挿したものである。また、参考として、 40°C および 80°C において測定された太陽電池の I-V 曲線を図 3.11 に示す。

測定の結果、本研究に用いる三接合型太陽電池の特性が確認された。この電池は 40°C において発電効率が 0.35 となり、温度上昇に伴っておよそ $-0.16\%/\text{C}$ の割合で効率が低下してゆく。一般的な結晶シリコン系の太陽電池では、 25°C における発電効率が十数%程度、そして温度上昇に伴う効率低下の割合が $-0.45\%/\text{C}$ 程度であり、これと比較して三接合型太陽電池の高温域での良好な発電特性が確認される。

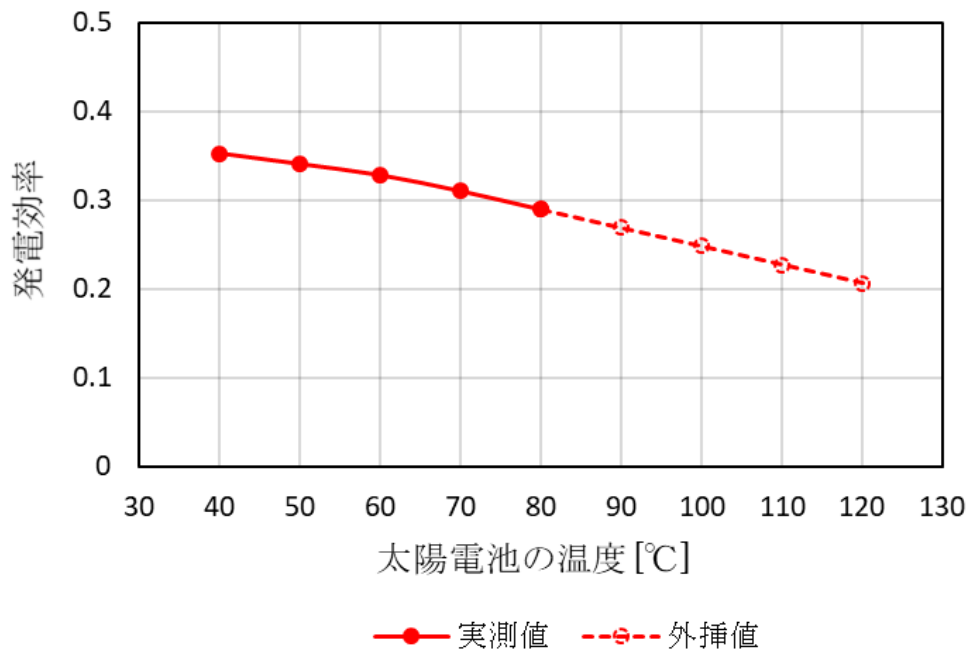


図 3.10 InGaP/InGaAs/Ge 三接合型太陽電池の発電効率の測定結果.

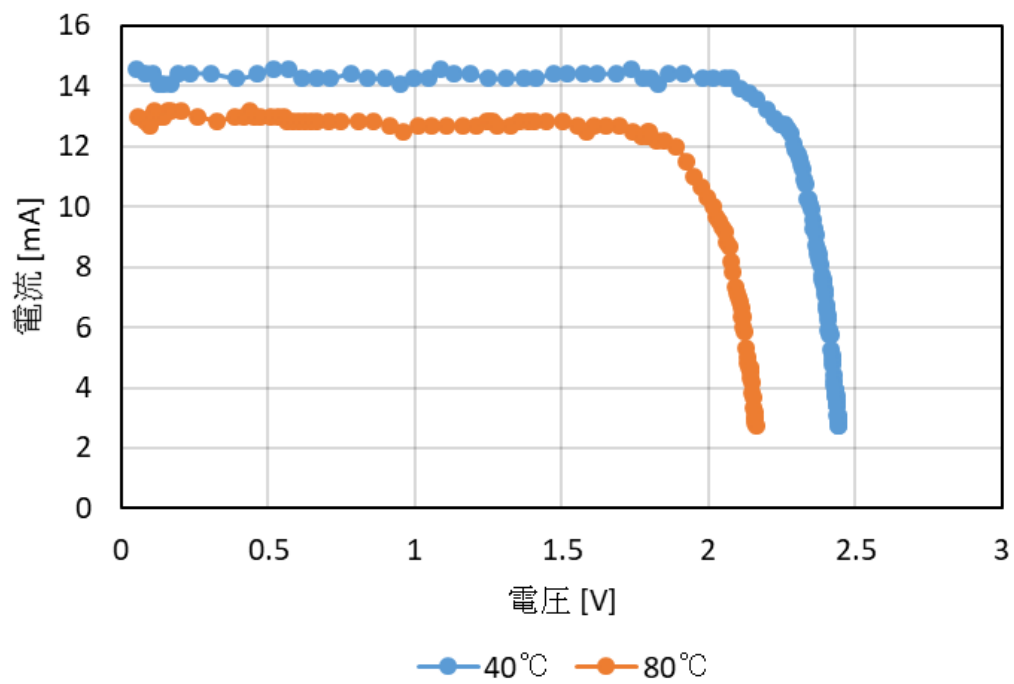


図 3.11 40 °C および 80 °C において測定された I-V 曲線.

3.4 单相流を用いた集熱実験の結果と考察

本節では、CPVT の集熱性能をより詳しく考察するため、本章第 1 節でも用いた 6 cm 四方の正方形熱交換器を利用して集熱実験を行った。第 1 節でも同様に集熱実験を実施したが、このときは焦点の大きさを調べるための実験であり、直達日射量以外のパラメータには注意を払わなかった。本節では、集光器のパラメータに着目し CPVT の熱利用システムとしての性能を議論する。

3.4.1 集熱実験の方法

集熱実験では、集光器によって集められたすべての光が熱交換器に照射されるよう、図 3.2 の熱交換器を焦点に一致するように設置する。また、冷却水は流量を最大値に設定したうえで可能な限り水温を低く保ち、確実に单相流のまま熱交換器へ流出入させる。この状態で熱交換器へ光を照射して集熱し、冷却水により回収された熱と集光器によって集められたエネルギーとを比較することにより集熱性能を考察する。

3.4.2 集熱実験の結果と考察

式(8)によれば、熱交換器による集熱量は集光器の面積、反射率、熱交換器の放射率および直達日射量とから予測することができる。本研究で用いるシステムでは、集光器の集光面積は 2.91 m² であり、反射率は測定の結果 0.77 である。また、熱交換器の放射率は塗布した黒体スプレーの公称値から 0.94 である。したがって、熱交換器に入射する熱量は

$$Q = 2.1\phi_{\text{dir}} \quad (13)$$

と表される。

図 3.12 に、集熱実験の結果得られた式(7)に基づく集熱量(熱交換器による実際の集熱量)、式(13)に基づく集熱量(熱交換器への入射エネルギー)および直達日射量と集光面積の積で表される集光器への入射エネルギーを示す。図 3.12 中に示された時間範囲で平均をとった値は、集光器への入射エネルギーが 2453 W、熱交換器への入射エネルギーが 1782 W、熱交換器による実際の集熱量が 1032 W であった。

この結果から、まず、式(6)に基づき本研究のシステムの集熱器としての効率が 42.1 %と求められる。また、図 3.12 が示す通り、式(13)から予測される集熱量と式(7)から求められる実際に集熱された熱量との間には 700 W 近い差がある。この差の原因として、集熱中に高温になる熱交換器と外気との間で熱伝達が起こることによる損失や、そもそも集光器の反射率が低下している可能性がある。

熱交換器と外気との間の熱伝達量は、風による平板上の強制対流を仮定することにより概算できる。平板上の強制対流においては、

$$Nu = 0.664Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}} \quad (Re < 10^5) \quad (14)$$

が成り立つ[45]。熱交換器を 0.06 m 四方の板と近似し、空気の流速として実験当日の柏市内の風速の測定値 2 m/s を用いるとき、熱伝達率 h は、

$$h = 23 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}, \quad Re = 8 \times 10^3 \quad (15)$$

となる。仮に熱交換器と外気との温度差を $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ としてもその伝熱量は数十 W 程度であるから、外気との伝熱による損失は式(7)と式(13)との差の主たる要因とはなりえない。

3.2 節で述べたとおり、屋外に設置された集光器の反射率は経年とともに低下する可能性がある。本節に述べた集熱実験は 3.2 節に述べた反射率計測実験から数か月経過後に実施されたものであり、仮に集熱実験時の集光器の反射率が 77% から大きく低下していたとすれば、集光器の反射率の低下を防ぐためにどのような方策がとれるかが今後の課題となる。

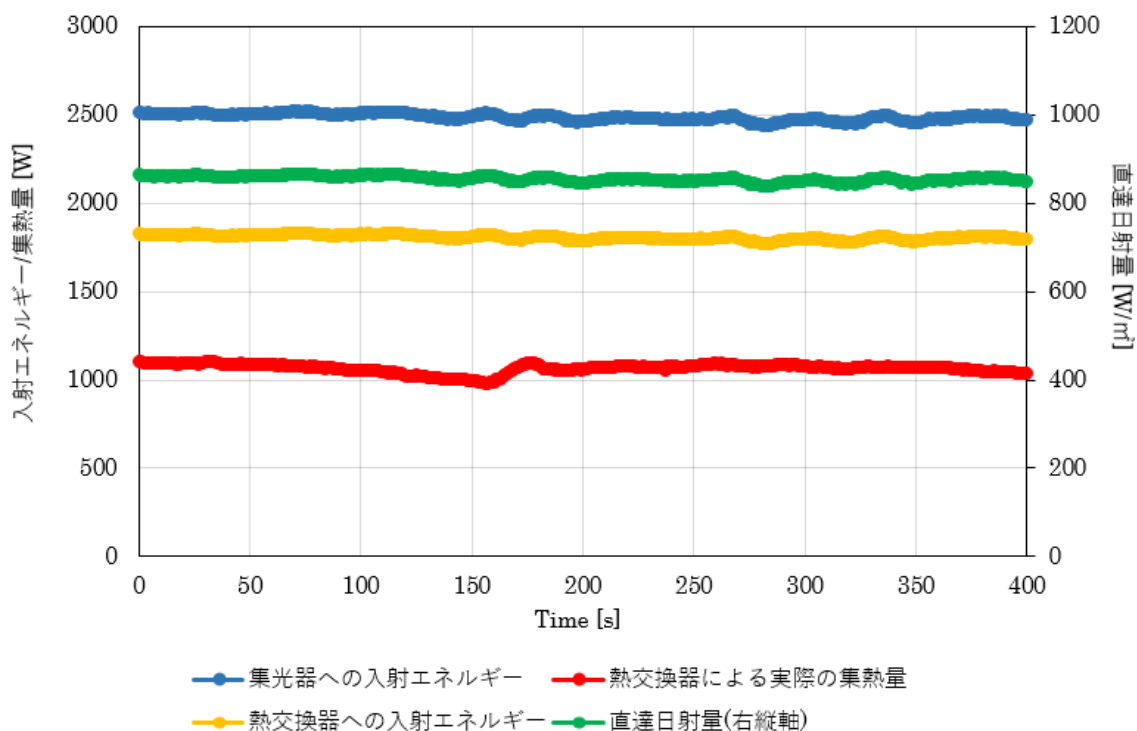


図 3.12 单相流を用いた集熱実験の結果.

3.5 気液二相流による発電・集熱実験の結果と考察

最後に、本研究の本題である気液二相流冷却を用いた発電・集熱実験の結果を述べる。本実験では、図 3.13 に示すように、三接合型太陽電池をはんだ付けした放射拡張流路型熱交換器を集光器に設置し、これまでの実験と同じ黒体スプレーを塗布したうえで集光し、発電と集熱を同時に行った。この実験の結果を図 3.14 および表 3.3 に示す。

図 3.14 において黄色の実線で示された熱交換器温度は、放射拡張流路型熱交換器の側面に設けられた測温用の微小な穴に熱電対を差し込むことによって測定された熱交換器中心部付近の温度である。この熱交換器温度と出口水温の差は(時間)平均的には 4.5 °C、最大 7.3 °C であり、熱交換器の温度は 100 °C から 110°C の間で安定していた。この間の集光倍率は約 200 倍であった(後述)。したがって、この実験の結果、気液二相流による安定的な冷却により高い集光倍率下でも発電が可能であることを実証し、発電と同時に 100 °C 程度の水蒸気と熱水を回収するという本研究の目的は達成された。

さらに、コージェネレーションシステムとしての性能を評価するため、実験の結果から以下のように発電効率と集熱効率を求める。

表 3.3 気液二相流を用いた実験の結果

測定した量	得られた測定値
直達日射量	539 W/m ²
太陽電池最大出力	2.40 W
熱交換器入口での水温	72.45 °C
同出口での水温	102.27 °C
冷却水流量	2.74 g/s

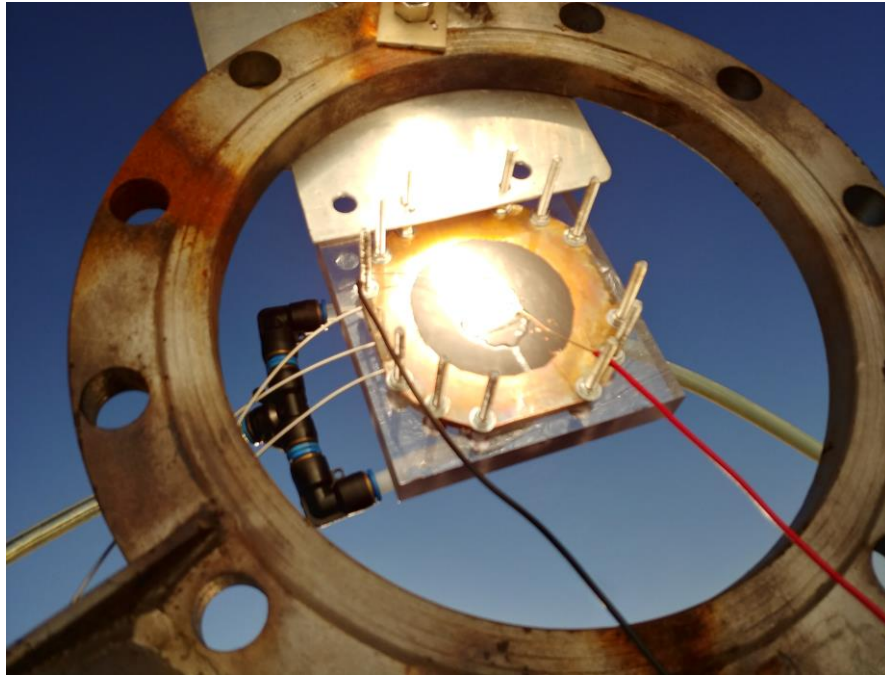


図 3.13 気液二相流を用いた実験の様子.

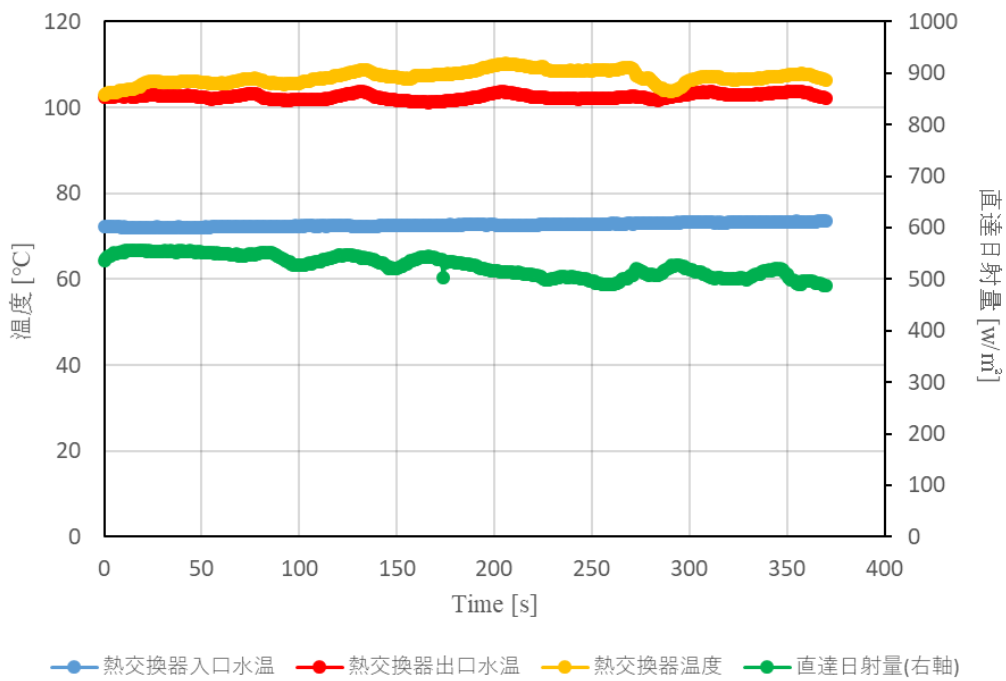


図 3.14 気液二相流を用いた実験の結果.

3.5.1 気液二相流による発電・集熱実験の集熱効率

単相流での集熱実験では、集熱量は熱交換器前後の冷却水の温度差をもとに式(7)にしたがって簡単に求めることが可能であった。一方、気液二相流が関わる伝熱ではこの式を用いることはできず、熱交換器内での蒸発量を正確に測定することも難しいため、表 3.3 に示される流量や温度差といった測定値のみから熱交換器における集熱量を直接的に求めることは困難である。そこで、本実験での集熱量はこれまでに実施した単相流での集熱量から間接的に求めることを試みる。

3.1 節で、式(7)で表される熱交換器による集熱量について、理想的には式(8)が成立し、同じ集光器と熱交換器を使うならば集熱量は直達日射量のみの関数となると述べた。また、3.4 節に述べた集熱実験の結果から、熱交換器と外気との伝熱によるエネルギーロスは十分に小さい。したがって、同じ集光器を用いる限り、集熱量は熱交換器の放射率と直達日射量の関数とみなせる。ここで、気液二相流による冷却に用いた熱交換器と単相流冷却に用いた熱交換器について、いずれも銅製で同じ黒体スプレーを塗布したことから両者の放射率は等しいと仮定すると、結局、気液二相流による冷却であってもその集熱量は直達日射量のみの関数となる。

本研究で用いた集光器と黒体スプレーでは、集熱量を直達日射量で割った値は 1.2 となる。表 3.3 より、気液二相流を用いた実験における直達日射量は 539 W/m^2 であるから、本実験における集熱量 Q は

$$Q = 1.2 \times 539 = 647 \quad (16)$$

すなわち 647 W であると求められる。また、集熱効率は 0.42 となる。

3.5.2 気液二相流による発電・集熱実験の発電効率

表 3.3 より、本実験で得られた太陽電池の最大出力は 2.4 W であった。この値と式(2)をもとに太陽電池の発電効率を求めるには、太陽電池上における放射照度の値を求めなければならない。

本実験では、熱交換器は焦点から 2.5 cm 後方に設置された。3.1 節の結果より集光器の焦点の直径は 2 cm であったから、式(12)より、焦点から 2.5 cm 後方における光の分布の半径は 3.23 cm となる。前項の結果と合わせると、半径 3.23 cm の円の内部に 647 W のエネルギーが分布することになり、その平均の放射照度として 197 kW/m^2 との値が得られる。

本実験で用いた太陽電池の面積は 1 cm^2 である。したがって、式(2)より、本実験ではその発電効率は 12.2% であった。

得られた発電効率は、図 3.10 に示される 100°C から 120°C 付近の発電効率と比較すると低い。この原因のひとつとして、太陽電池の温度が熱交換器の温度よりもはるかに高くなっているという可能性が考えられる。水の気液二相流を利用する場合、熱交換器の温度は 100°C 前後となる。この熱交換器と太陽電池との温度差は式(1)の通りはんだ付け部分の熱抵抗により定まる。仮にはんだ付けが完全でなく、十分に薄く接着できていない等の問題が

あった場合、高集光倍率下では電池と熱交換器の温度差が増大する可能性がある。より正確に発電性能を見積もるためには、何らかの方法を用いて太陽電池自体の表面温度を測定する必要がある。

また、太陽電池と熱交換器との温度差は、式(1)にある通り、太陽電池自身の熱抵抗にも依存する。太陽電池自体の設計は本研究の対象外であるが、今後のいっそうの高集光倍率化も見据えるならば、太陽電池の裏面に微細流路を実装するなど、太陽電池の熱抵抗を小さくするより直接的な冷却方法を開発することが今後の課題のひとつとして挙げられる。

第4章 焦点における放射照度分布の均一化に関する研究

4.1 緒言

第3章までに述べた研究では、熱交換器に固定した1個の三接合型太陽電池に集光し、その性能が議論された。より実用的な状況を考えるならば、この太陽電池を数十個接続した図4.1のような太陽電池モジュールによる大電圧・大電力下でのCPVTの運転へと研究の段階を進めなければならない。

放物面集光器を用いるCPVTでは、集光された光は焦点近傍の狭い領域に集中的に分布する。一方で、典型的な太陽電池モジュールは数cmから十数cm四方程度の大きさをもつ。すなわち、太陽電池モジュールをそのまま放物面集光器の焦点に設置した場合、モジュールを構成する太陽電池の一部のみに光が照射され、残る大部分の太陽電池は陰となる。太陽電池モジュール上でのこうした光の不均一な分布はモジュールに含まれる個々の太陽電池の発電量の不均一や熱流束の不均一による温度分布の不均一を惹起し、これらはモジュールとしての発電性能に対して悪影響を及ぼすことが知られている[46-48]。

集光に伴うモジュールにおける光の不均一化はCPVT一般において不可分の課題であるが、放物面集光器を用いるCPVTではとりわけ顕著であり、克服すべき課題としてこれまで多くの研究の対象となってきた。

放物面集光器において太陽電池モジュール上での光の不均一を緩和する最も単純な方法は、モジュールを焦点の後方へずらして設置することである(図4.2)。光が集まった領域の面積は焦点から離れるほど大きくなるため、この光の領域がモジュール全体を覆う程度にまでモジュールを後方へずらせば、モジュール内のすべての太陽電池が光に照らされ、一定の発電能力を得ることになる。しかしながら、焦点の後方における光の分布は図3.6に示すように均一度が高いわけではなく、この方法には改善の余地がある。

本章では、集光部の放射照度分布を均一化する手段としてChenら[49]によって提案された“Kaleidoscope Homogenizer”等と呼ばれる装置を導入することにより問題の解決を目指す。Kaleidoscope(万華鏡)の名が示す通り、この装置は内側表面が反射鏡となった中空の構造をとっており、一端から入った光が内部で反射を繰り返しつつ通過することで、出口において放射照度分布が均一に近づくというものである。この装置の概略図を図4.3に示す。以下、この装置を「拡散器」と称するものとする。この拡散器を放物面集光器の焦点の位置に設置し、拡散器の出口に太陽電池モジュールを配置することにより、均一な光によるモジュール発電効率の向上が期待される。

本研究の最終的な目標点は、拡散器を実際にCPVTへ導入し、焦点近傍における高集光倍率かつ高度に均一な光を用いて高効率で実用的な太陽光発電・熱利用を実現することである。

る. しかしながら, そもそも拡散器の設計に際して参照できるような拡散器の一般的な性質は現在のところ明らかとなっていない. 拡散器を対象としてその有用性をシミュレーションにより検討した研究はこれまでにいくつか存在する[50,51 など]ものの, これらはいずれも特定の放物面集光器を対象としており一般性をそなえているとは言い難く, これらの研究の結果をそのまま利用することはできない. すなわち, 拡散器を CPVT に導入するには, まず拡散器の基本的性質を明らかにすることが必要である.

本章では, 適当なソフトウェアを用いて本研究に用いている放物面集光器をモデル化してシミュレーションを行うことによって拡散器の基本的な性質を明らかにすることを目指す.



図 4.1 太陽電池モジュール.

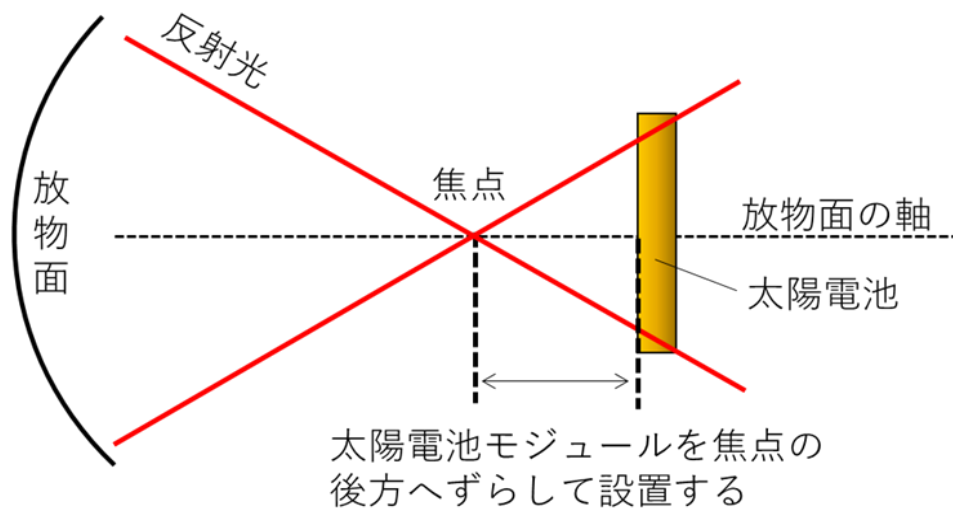


図 4.2 光の分布の均一化の最も単純な方法.

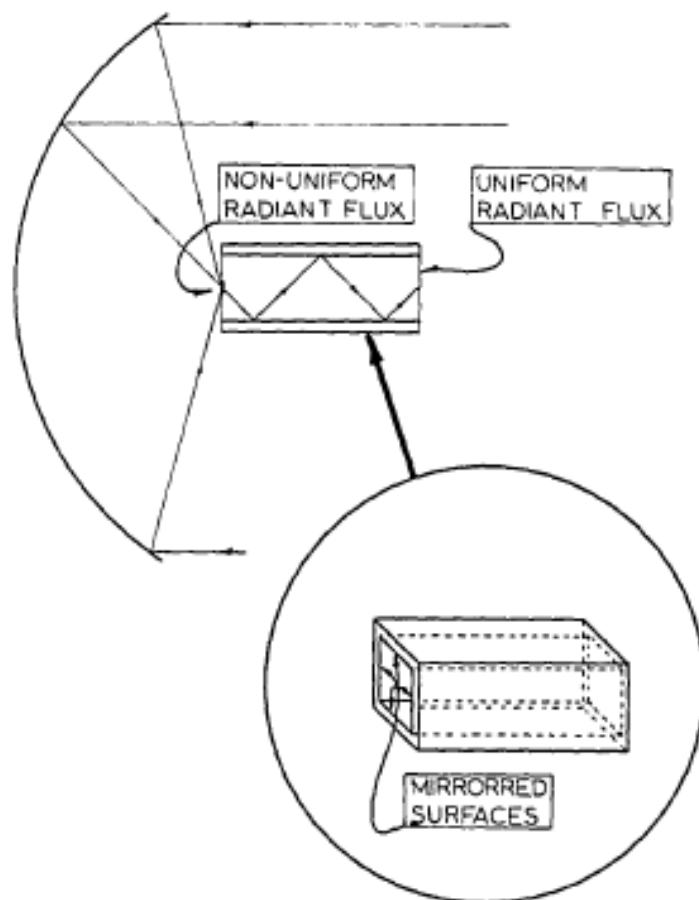


図 4.3 拡散器の概要[49].

4.2 拡散器に関するシミュレーション

4.2.1 解析の方法と条件

本解析の目的は、拡散器の設計の指針となるその基本的な性質を調べることである。ここでは、基本的な性質として拡散器の形状および拡散器の長さに着目し、以下に述べる解析を行う。

解析には、光線追跡法によるシミュレーションソフトウェア“LightTools”(Synopsys 社製)を用いる。ここでの主な解析条件を表 4.1 に示す。解析では、集光器として直径 2 m、焦点距離 1.3 m の理想的な回転放物面を使用し、その反射率は 90 % とする。拡散器の内側表面の反射率も 90 % とする。この集光器の焦点の位置と拡散器の入口が一致するように拡散器を配置する。太陽放射は 1 kW/m² とする。

まず、拡散器の形状について解析を行う。正 n 角形の形状をした長さ 500 mm の拡散器をソフトウェア内でモデル化し、 $n=3, 4, 5, 6, 8, 12$ および $n \rightarrow \infty$ (円) に対して、その形状と出口における放射照度分布との関係性を調べる。次に、拡散器の長さについて調べるため、同じく正 n 角形 ($n=3, 4, 5, 6, 8, \infty$) の拡散器について、その長さ L を 50 mm から 500 mm まで変化させ、拡散器の長さとして出口における放射照度分布との関係性を調べる。解析に用いる拡散器のモデルを図 4.4 に示す。いずれも直径 230 mm の円筒から正 n 角形をくり抜いた形状となっており、この正 n 角形は面積が 100 cm² となるように定義する。また、参考として、解析の様子を図 4.5 に示す。

表 4.1 解析条件.

放物面直径	2.0 m	拡散器反射率	90 %
焦点距離	1.3 m	太陽放射	1 kW/m ²
放物面反射率	90 %	解析光線数	100M

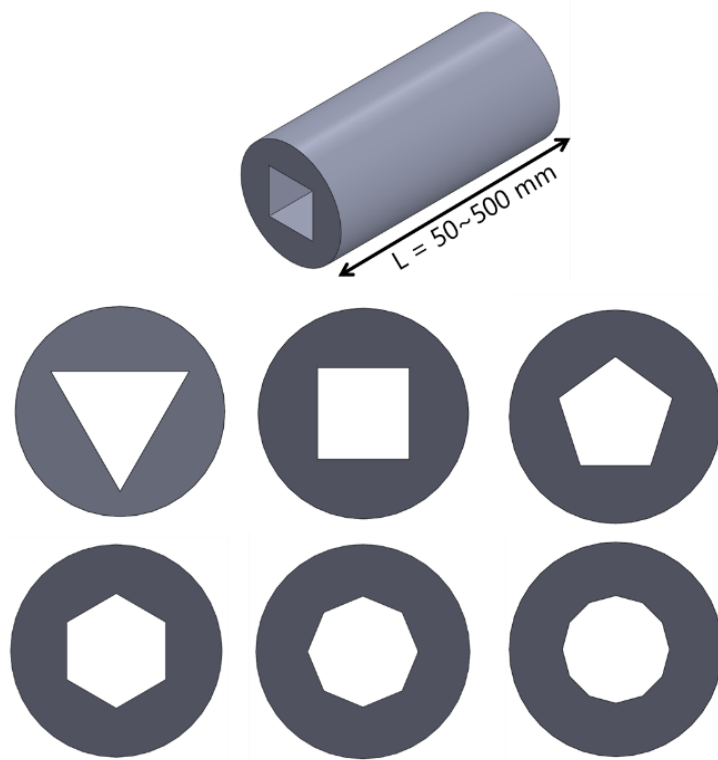


図 4.4 解析に用いる拡散器の形状と長さ.

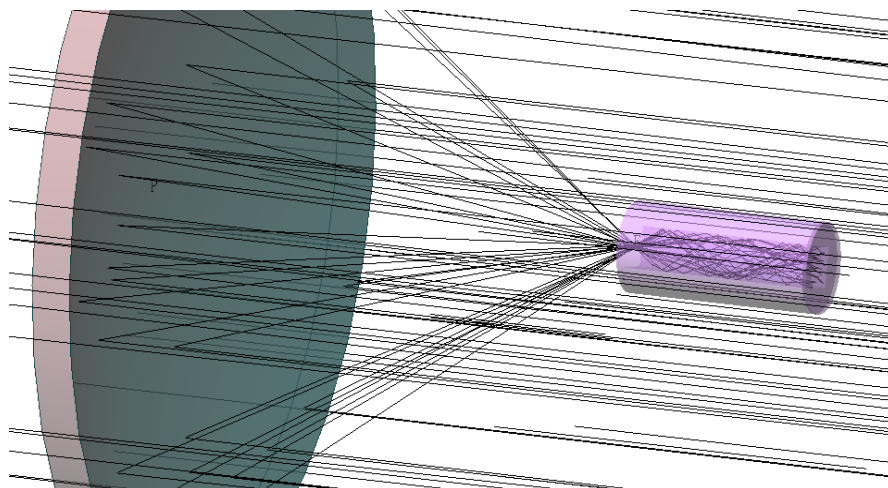


図 4.5 解析の様子.

4.2.2 解析結果と考察

拡散器の長さや形状について議論する前に、拡散器が光の放射照度分布にどのような影響を及ぼすかを視覚的に理解するため、500 mm の長さの正方形拡散器を例に、拡散器の内部における長さ方向での光の均一化の様子を簡単に可視化する。図 4.6(A)-(H)に拡散器の入口からの各距離における放射照度分布を示す。(A)は拡散器入口における、(B)-(H)はそれぞれ入口から 60 mm, 80 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm の距離における放射照度分布である。図 4.6 には、光が拡散器を通過することによりその分布の形状が変わり、また距離が長くなるにつれて均一性が上昇する様子が示されている。この様子を踏まえたうえで、以下、拡散器の形状や長さの解析結果を示す。

(1) 拡散器の形状と放射照度分布

まず、拡散器の形状と出口放射照度分布との関係性について、解析した結果を図 4.7 に示す。図 4.7(A)は拡散器入口(すなわち放物面の焦点)における光の放射照度分布の様子を、(B)-(H)はそれぞれ正三角形、正方形、正五角形、正六角形、正八角形、正十二角形および円の形状を持つ長さ 500mm の拡散器の出口における放射照度分布の様子を示す。図 4.7 は、有用な拡散器に許される形状には一定の制限があることを示唆している。図で、 n が 6 以下のとき拡散器出口における放射照度の分布の形状は拡散器の形状に従っている。しかし、 $n=8$ でその分布の形状が崩れ始め、 $n=12$ では放射照度分布は円形となり中心の放射照度が周辺よりも高くなっている。そして $n \rightarrow \infty$ の円筒形拡散器では光は中心付近に集中し、もはや拡散器としての機能が発揮されていない。すなわち、正 n 角形拡散器では n が一定の値以下の場合に出口放射照度分布の形状が拡散器の形状と一致し均一度も高いが、 n が大きくなるにつれて円筒型拡散器を用いた場合の結果に近づき、拡散器としての性能も落ちる傾向があると考えられる。

(2) 拡散器の長さと放射照度分布

次に、正 n 角形($n=3, 4, 5, 6, 8, \infty$)の拡散器について、その長さや出口放射照度に関する解析の結果を記す。最初に、拡散器の長さや出口における光の総エネルギーとの関係を図 4.8 に示す。図の横軸は拡散器の長さ、縦軸は各長さの拡散器の出口における光の平均放射照度であり、点は 100 mm 間隔でとられている。拡散器の出口面積はすべて等しいことから、縦軸は拡散器出口における総エネルギーに対応する。拡散器の内面の反射率は 90 %と仮定しているため、光がその面で反射するたびにエネルギーの一部が拡散器へ吸収される。図 4.8 から明らかなように、0 mm を除くどの点においても、 n が大きいほどその面におけるエネルギーは大きい。すなわち、 n が大きいほどエネルギーロスが小さくなっている。

また、図 4.9 に、正 n 角形($n=3, 4, 5, 6, 8$)の拡散器の長さや出口における放射照度分布の均一度について解析した結果を示す。図の横軸は拡散器の長さ、縦軸は均一度であり、これらの点は 2 mm 間隔でプロットされている。なお、均一度 N の定義は様々にありうるが、ここ

では次式の通り定義する.

$$N = \frac{E_{\max}}{E} \quad (17)$$

式(17)の右辺の分子と分母はそれぞれ拡散器出口における放射照度の最大値と平均値を表す. 図 4.9 では, $n=3, 4, 6$ については拡散器の長さが増すに従い均一度は振動しつつも全体として右上がりに上昇する様子が, $n=5, 8$ については均一度が周期的に大きく振動する様子が示されている.

(3) 考察

今回の解析では, $n=3, 4, 5, 6, 8$ および $n \rightarrow \infty$ の場合の様々な長さの正 n 角形拡散器の出口放射照度分布について調査した. これまでの解析結果を踏まえると, 有効な n の値を絞り込むことが可能である. まず, 拡散器の目的はその出口において均一な放射照度を得ることであったが, この観点から $n \rightarrow \infty$ および $n=5, 8$ は不適當である. $n \rightarrow \infty$ は図 4.6 に示されるように明らかに均一化の効果がみられない. $n=5$ と $n=8$ についても, 図 4.9 に示されるように拡散器の長さを増加させても均一度の周期的な振動が減衰せず, 拡散器の製造や据付時の誤差などによりその実際の長さがわずかに変化する等した場合に均一度が大きく変化する可能性があるからである.

次に, 残る $n=3, 4, 6$ については, 図 4.9 ではその均一度に明確な違いは見られない. そこで, これらの n の値に対しては出口放射照度分布の形状が拡散器の形状に従う(図 4.7)ことに着目する. 実際の運転条件では, 拡散器の出口に図 4.1 のような正方形型の小型太陽電池を複数個接続し発電を行う. 面積の等しい正三角形, 正方形, 正六角形に正方形の電池を敷き詰めるとき, 最も多くの太陽電池を包含することができるのは明らかに正方形である. 図 4.8 で正六角形拡散器のほうが正方形拡散器よりもエネルギーロスが小さいことが示されているが, 両方でエネルギーロスの差は高々 5 %程度であり, この差はより多くの太陽電池を正方形内に敷き詰めることで容易に挽回できるものであると考えられる.

以上をまとめると, 拡散器の設計にあたって, 次の指針が得られる. すなわち, 拡散器の形状は正方形とし, その長さは, 製造や組み立て時の誤差に対する緩衝性を確保するため均一度の振動がある程度減衰するのに十分な長さをとったうえで均一度の最も高くなる長さを選べばよい.

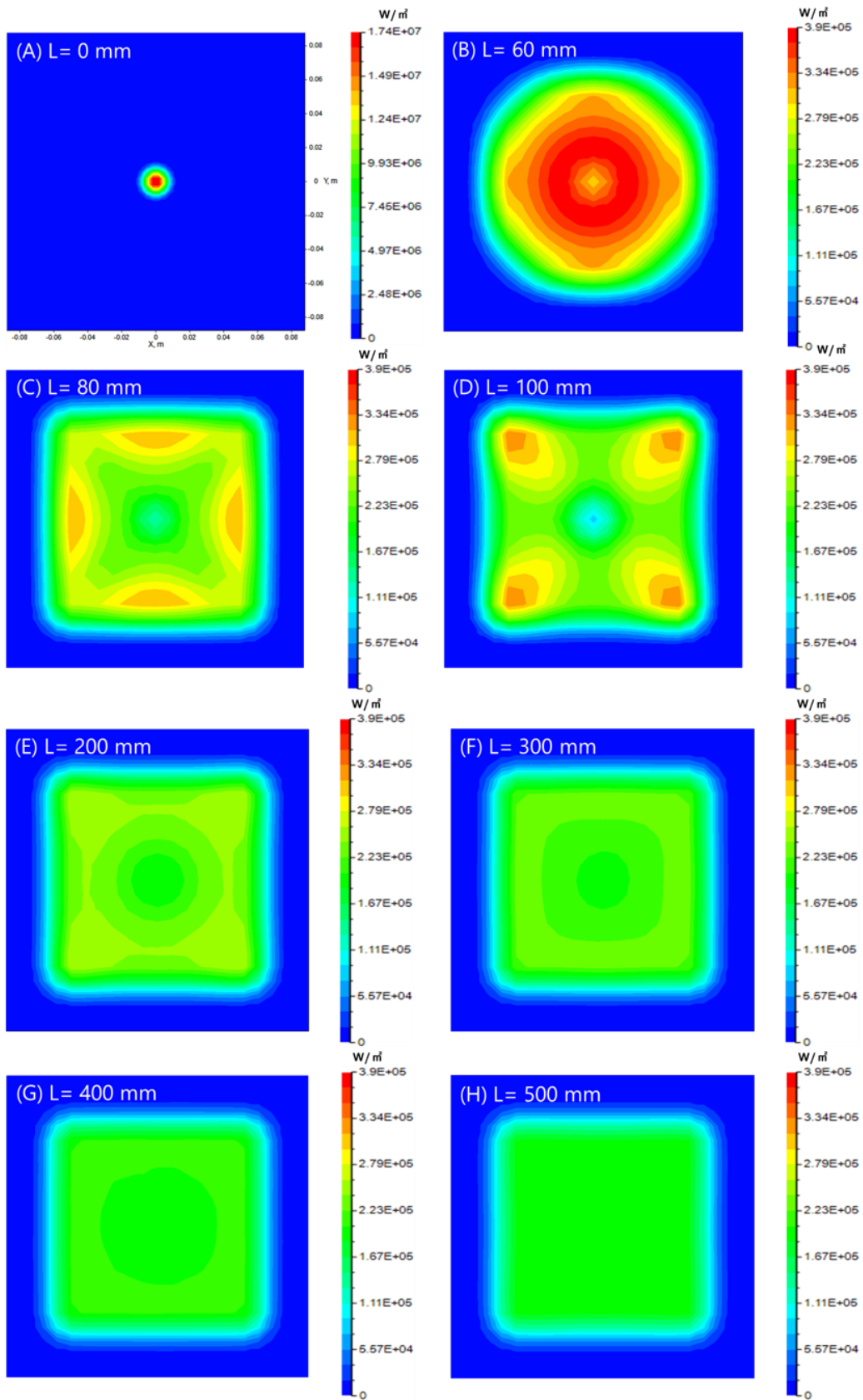
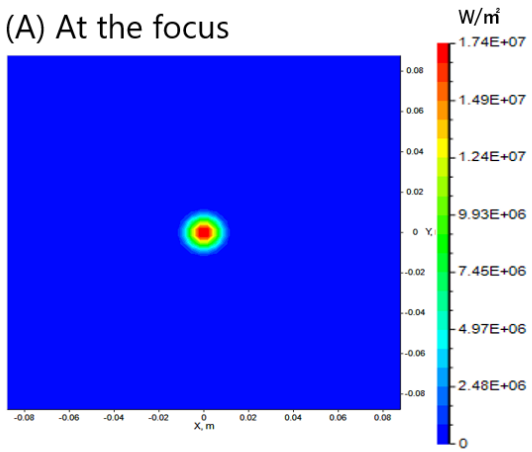
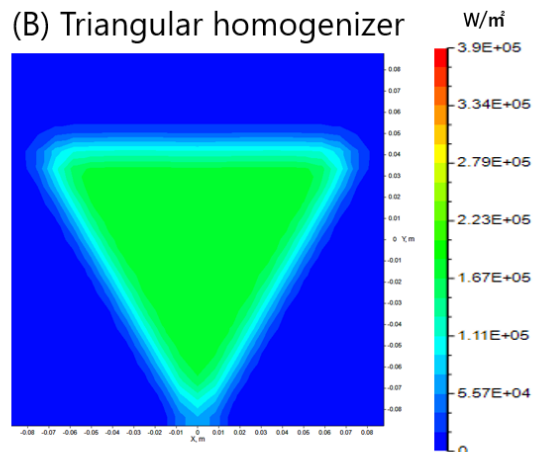


図 4.6 拡散器出口における放射照度分布の計算値. L は拡散器入口からの距離を表す.

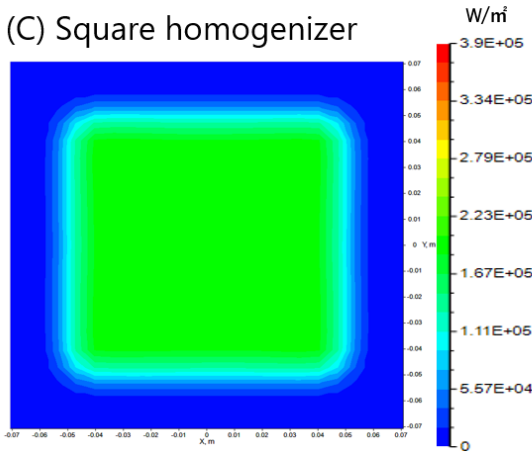
(A) At the focus



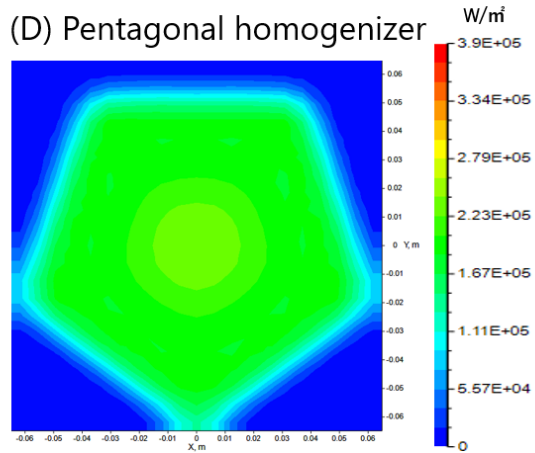
(B) Triangular homogenizer



(C) Square homogenizer



(D) Pentagonal homogenizer



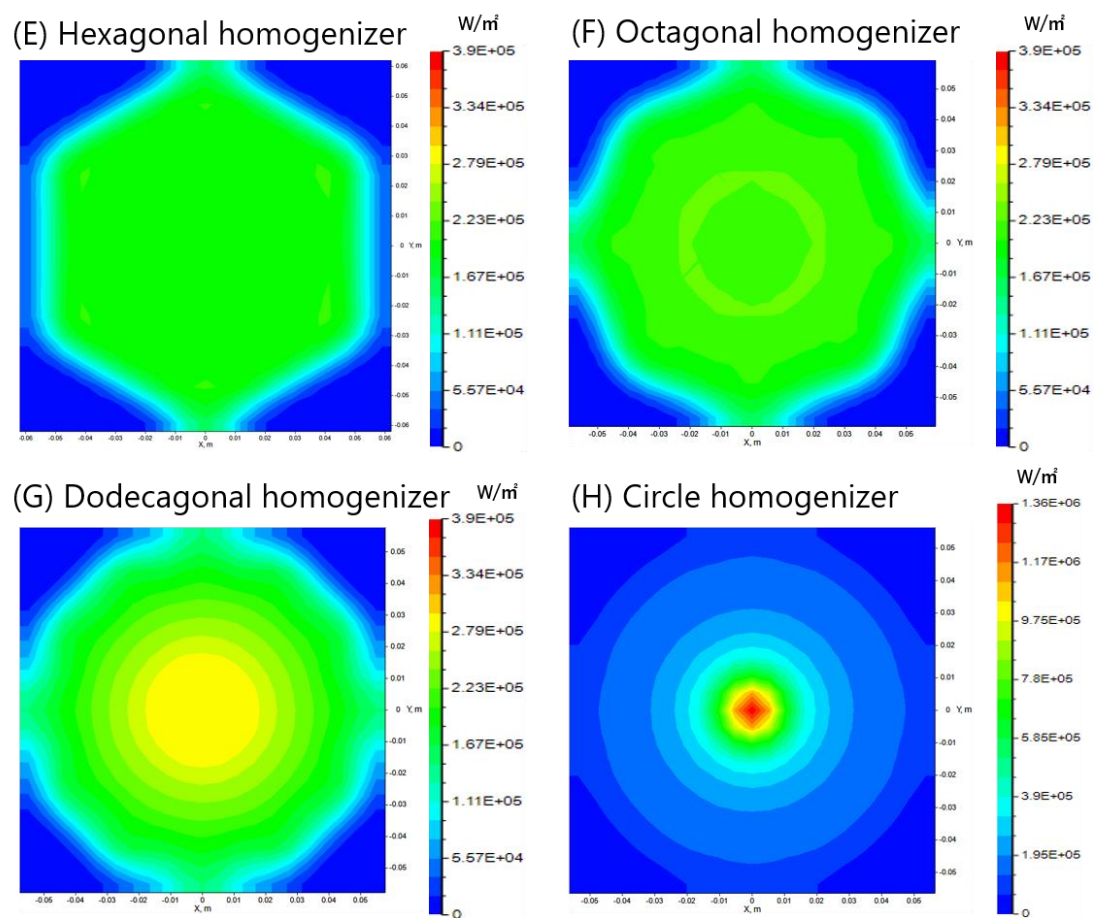


図 4.7 放射照度分布の計算結果. (A)は拡散器入口での, (B)~(H)はそれぞれ三角形, 正方形, 正五角形, 正六角形, 正八角形, 正十二角形および円形の拡散器出口における放射照度分布である. いずれも拡散器の長さは 500 mm である.

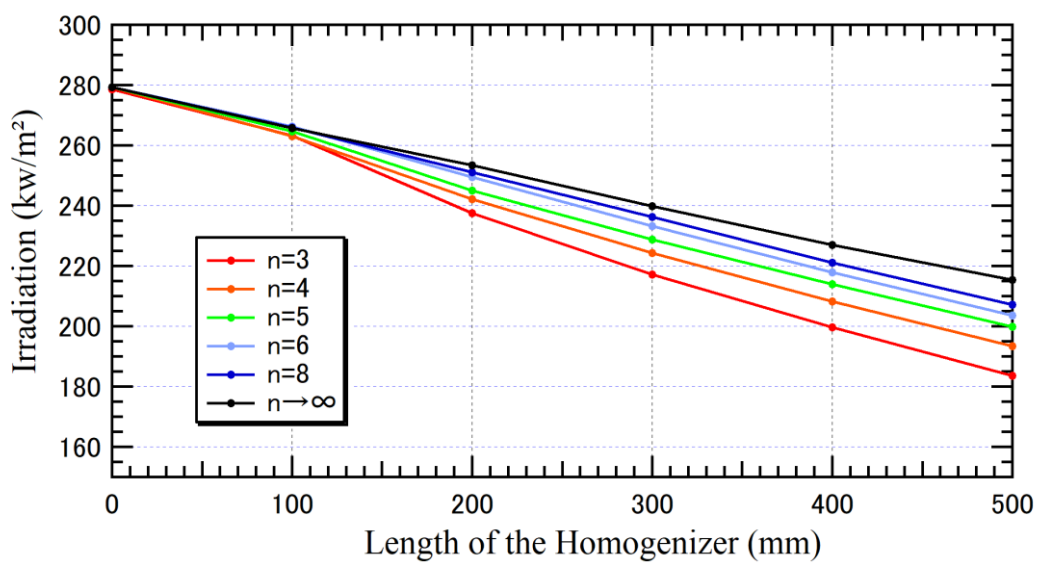


図 4.8 拡散器の長さとおける平均放射照度との関係.

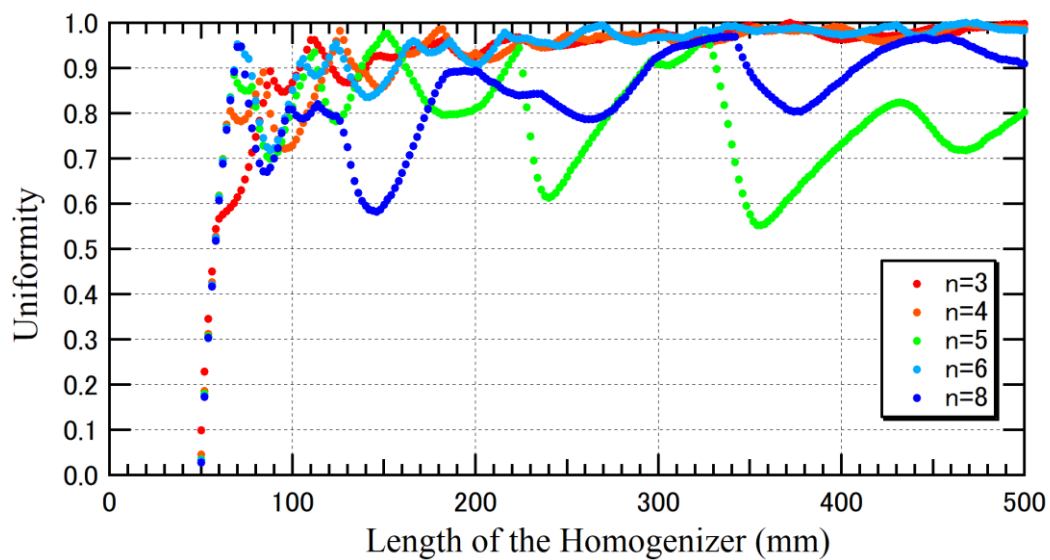


図 4.9 拡散器の長さとおける放射照度分布の均一度に関する計算結果.

4.3 本章の結言

本章では、放物面型反射鏡を用いた集光型太陽光発電の発電効率を向上させる手段として拡散器に着目し、まず、その設計の際に考慮すべき拡散器の基本的な性質をシミュレーションにより明らかにし、以下の知見を得た。

- (1)正 n 角形の形状をもつ拡散器で、放物面集光器を用いる CPVT に最も適した形状は正方形である。
- (2)拡散器出口における放射照度分布の均一度は、拡散器の長さに対して周期的に変化する。拡散器の製造や据付時の誤差の影響を軽減するためには、一定以上の長さが必要である。
- (3)その一方で、拡散器が長いほどエネルギーロスが増加する。このロスと均一度の向上による発電効率の上昇との最適なバランスをとるように長さを決定する必要がある。

第 5 章 結論

本研究では、放射拡張流路型熱交換器を用いた放物面 CPVT について研究し、次の結果を得た。

- (1) 放射拡張流路型熱交換器を用いることで、気液二相流による太陽電池の安定的な冷却が可能となり、集光倍率 200 倍の高集光倍率下においても発電が可能となった。
- (2) CPVT の冷却に気液二相流を利用することで、熱源としての利用価値が高い 100 °C 程度の水蒸気と熱水を回収することが可能となる。
- (3) 本研究では、放射拡張流路型熱交換器と三接合型太陽電池を組み合わせ、発電効率 12%、熱効率 42% のコージェネレーションシステムが実現された。

さらに、太陽電池モジュールを放物面 CPVT に用いる場合の発電効率の向上の手段として拡散器に着目し、その設計の際に考慮すべき拡散器の基本的な性質をシミュレーションにより明らかにし、以下の知見を得た。

- (4) 拡散器は放物面集光器の焦点における放射照度分布の均一化に有効な手段である。
- (5) 正 n 角形の形状をもつ拡散器で、放物面集光器を用いる CPVT に最も適した形状は正方形である。
- (6) 拡散器の長さを増すほど光の均一度は増すが、エネルギーロスも増加する。均一度の向上による発電効率の向上とエネルギーロスとの最適なバランスをとるように長さを決定する必要がある。

また、本研究で得られた結果を踏まえ、今後検討すべき次のような課題が見いだされた。

- (a) 放射拡張流路型熱交換器にはんだ付けによって接合された太陽電池は、高集光倍率下では熱交換器との間に大きい温度差がある可能性がある。太陽電池の表面温度を何らかの方法によって測定あるいは推定する必要がある。
- (b) はんだ付けでは熱抵抗が十分に小さくできない場合や、将来的にさらに高い集光倍率を目指す場合、太陽電池自体に微細流路を実装するなど、より高性能の冷却方法を検討する必要がある。
- (c) 拡散器を実際に製作する場合、エネルギーロスを最小化するための高い反射率を実現する方法を検討する必要がある。

参考文献

- [1] G. Li, Q. Xuan, G. Pei, Y. Su, J. Ji. “Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell- A review”. *Energy* 144 (2018) 1119-1136
- [2] S. Sargunanathan, A. Elango, S. T. Mohideen. “Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64 (2016) 382-393
- [3] “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development”. 国連サミット 2015年9月
- [4] 喜多 隆 著. 『太陽電池のエネルギー変換効率』. コロナ社 (2016)
- [5] S. Jakhar, M. S. Soni, N. Gakkhar. “Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016) 41-59
- [6] 経済産業省資源エネルギー庁. 『平成 30 年度エネルギーに関する年次報告』.
- [7] D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson. “A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power”. *Journal of Applied Physics* 25 (1954) 676-677
- [8] N. Rathore, N. L. Panwar, F. Yettou, A. Gama. “A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications”. *International Journal of Ambient Energy* 40 (2019) 1-18
- [9] 東芝. 『住宅用太陽光発電システム』総合カタログ.
- [10] 京セラ. 『住宅用太陽光発電システム』カタログ.
- [11] SHARP. 『住宅用エネルギーソリューションシステム』総合カタログ.
- [12] Panasonic. 『住宅用太陽光発電システム/リチウムイオン蓄電システム』WEB カタログ.
- [13] 三菱電機. 『住宅用太陽光発電システムカタログ』.
- [14] D. J. Friedman. “Progress and challenges for next-generation high-efficiency multijunction solar cells”. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 14 (2010) 131-138
- [15] A. D. Vos. “Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells”. *Journal of Physics D: Applied Physics* 13 (1980) 839-846
- [16] F. Almonacid, P. J. Pérez-Higueras, E. F. Fernández, P. Rodrigo. “Relation between the cell temperature of a HCPV module and atmospheric parameters”. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 105 (2012) 322-327
- [17] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構. 「革新的太陽光発電技術」プロジェクト.
- [18] S. Sharma, K. K. Jain, A. Sharma. “Solar cells: In research and applications- A review”. *Materials sciences and Applications* 6 (2015) 1145-1155
- [19] National Renewable Energy Laboratory. Crescent Dunes Solar Energy Project.

- [20] H. Li, Y. J. Dai, Y. Li, D. La, R. Z. Wang. “Experimental investigation on a one-rotor two-stage desiccant cooling/heating system driven by solar air collectors”. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 3677-3683
- [21] M. M. A. Khan, R. Saidur, F. A. Al-Sulaiman. “A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017) 105-137
- [22] Solarreserve 社. <http://www.solarreserve.com/>
- [23] O. Z. Sharaf, M. F. Orhan. “Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I- Fundamentals, design considerations and current technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015) 1500-1565
- [24] B. A. Butler, E. E. van Dyk, F. J. Vorster, W. okullo, M. K. Munji, P. Booyesen. “Characterization of a low concentrator photovoltaics module”. *Physica B: Condensed Matter* 407 (2012) 1501-1504
- [25] P. Pérez-Higueras, E. Muñoz, G. Almonacid, P. G. Vidal. “High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1810-1825
- [26] C. L. Wang, J. H. Gong, J. J. Yan, Y. Zhou, D. W. Fan. “Theoretical and experimental study on the uniformity of reflective high concentration photovoltaic system with light funnel”. *Renewable Energy* 133 (2019) 893-900
- [27] M. Mohsenzadeh, R. Hosseini. “A photovoltaic/thermal system with a combination of a booster diffuse reflector and vacuum tube for generation of electricity and hot water production”. *Renewable Energy* 78 (2015) 245-252
- [28] J. S. Coventry. “Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector”. *Solar Energy* 78 (2005) 211-222
- [29] M. Li, X. Ji, G. L. Li, Z. M. Yang, S. X. Wei, L. L. Wang. “Performance investigation and optimization of the Trough Concentrating Photovoltaic/Thermal system”. *Solar Energy* 85 (2011) 1028-1034
- [30] L. R. Bernardo, B. Perers, H. Hakansson, B. Karlsson. “Performance evaluation of low concentrating photovoltaic/thermal systems: A case study from Sweden”. *Solar Energy* 85 (2011) 1499-1510
- [31] M. Chaabane, W. Charfi, H. Mhiri, P. Bournot. “Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems”. *Solar Energy* 98 (2013) 315-321
- [32] C. Feng, H. Zheng, R. Wang, X. Ma. “Performance investigation of a concentrating photovoltaic/thermal system with transmissive Fresnel solar concentrator”. *Energy Conversion and Management* 111 (2016) 401-408
- [33] N. Xu, W. Sun, W. Huang, J. Li, Z.jin. “Numerical simulation and experimental validation of a

- high concentration photovoltaic/thermal module base on point-focus Fresnel lens”. *Applied Energy* 168 (2016) 269-281
- [34] B. K. Widyolar, M. Abdelhamid, L. Jiang, R. Winston, E. Yablonovich, G. Scranton, D. Cygan, H. Abbasi, A. Kozlov. “Design, simulation and experimental characterization of a novel parabolic trough hybrid solar photovoltaic/thermal (PV/T) collector”. *Renewable Energy* 101 (2017) 1379-1389
- [35] S. S. Joshi, A. S. Dhoble. “Photovoltaic-Thermal systems (PVT): Technology review and future trends”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (2018) 848-882
- [36] K. Araki, H. Uozumi, M. Yamaguchi. “A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500 X concentrator PV module”. *IEEE* 29(1) (2002) 1568-1571
- [37] G. Xiao, T. Yang, D. Ni, K. Cen, M. Ni. “A model-based approach for optical performance assessment and optimization of a solar dish”. *Renewable Energy* 100 (2017) 103-113
- [38] Y. Shuai, X. L. Xia, H. P. Tan. “Radiation performance of dish concentrator/cavity receiver systems”. *Solar Energy* 82 (2008) 13-21
- [39] A. M. Bonanos. “Error analysis for concentrated solar collectors”. *Journal of renewable and sustainable energy* 4 (2012) 1-11
- [40] H. Li, W. Huang, F. Huang, P. Hu, Z. Chen. “Optical analysis and optimization of parabolic dish solar concentrator with a cavity receiver”. *Solar Energy* 92 (2013) 288-297
- [41] C. F. Chen, C. H. Lin, H. T. Jan, Y. L. Yang. “Design of a solar concentrator combining paraboloidal and hyperbolic mirrors using ray tracing method”. *Optics Communications* 282 (2009) 360-366
- [42] S. Hong, C. Dang, E. Hihara. “Experimental investigation on flow boiling in radial expanding minichannel heat sinks applied for low flow inertia condition”. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 143 (2019) 118588
- [43] JIS Z 3282 : 2017. はんだ—化学成分及び形状
- [44] 金山公夫, 馬場弘 著. 『ソーラーエネルギー利用技術』. 森北出版株式会社 (2004)
- [45] 日本機械学会 著. 『伝熱工学』. 丸善株式会社 (2005)
- [46] Y. Meller, A. Kribus. “Kaleidoscope homogenizers sensitivity to shading”. *Solar Energy* 88 (2013) 204-214
- [47] M. Schmitz, F. Dähler, F. Elvinger, A. Pedretti, A. Steinfeld. “Nonimaging polygonal mirrors achieving uniform irradiance distributions on concentrating photovoltaic cells”. *Applied Optics* 56 (2017) 3035-3052
- [48] G. Segev, A. Kribus. “Performance of CPV modules based on vertical multi-junction cells under non-uniform illumination”. *Solar Energy* 88 (2013) 120-128
- [49] M. M. Chen, J. B. Berkowitz-Mattuck, P. E. Glaser. “The Use of a Kaleidoscope to Obtain Uniform Flux Over a Large Area in a Solar or Arc Furnace”. *Applied Optics* 2 (1963) 265-271

- [50] K. Kreske. "Optical design of a solar flux homogenizer for concentrator photovoltaics". *Applied Optics* 41 (2002) 2053-2058
- [51] H. Helmers, W. Y. Thor, T. Schmidt, D. W. Rooyen, A. W. Bett. "Optical analysis of deviations in a concentrating photovoltaics central receiver system with a flux homogenizer". *Applied Optics* 52 (2013) 2974-2984

謝辞

本研究は、東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻飛原・党研究室において2018年4月から2020年1月までの期間に実施されました。2年間にわたるこの研究を今日ここに修士論文として無事に結ぶことが出来たのは、ひとえに研究室の皆様の惜しみなきお力添えがあってこそのことと、ただただそのご厚意に感じ入るばかりです。言を尽くしてなお余りあるこの感謝の意ではありますが、せめて精一杯の御礼をここに申し上げる次第です。

飛原英治先生には、研究を進めるうえで多大なるご指導を賜りました。飛原先生のお話から窺われる研究者としての高い見識、研究のみならず工学や産業全般の事柄にまでおよぶその慧眼、これらに接しては敬服の念に堪えず、畏れさえ抱かばかりでした。飛原先生は今年度をもって定年によりご退官なされますが、今後も末永くお健やかにご活躍なされることを心よりお祈り申し上げます。

指導教員である党超鋌先生には、研究に直接的に関わる事柄は言うに及ばず、論文の書き方や研究発表の資料の作り方、さらには研究に対する心構えにいたるまで、微に入り細に入り実に多くのご指導を賜りました。修士課程において党先生から賜った教えの数々は、私が今後社会人として工学に携わるなかで必ず役に立つものと確信しております。

このほかにも、秘書の河合さん、近松さん、竹間さん、吉見さん、研究員の斎藤さん、何さん、伊藤さん、東さん、洪さん、修士課程の芦原君、山村君、張之華君、張博涵君、董さん、李君、楊君、高山さん、徳永君、平田君にも様々な面で御世話になりました。まとめて甚だ恐縮ではありますが、ここに御礼申し上げます。

来年度からは、研究室の多くの方が就職や進学によりそれぞれの進路を歩むこととなると聞いております。すべての方々の今後の末永きご活躍を希うとともに、これまでに頂いたご厚意に改めて御礼を申し上げ、謝辞といたします。