



宮崎大学学術情報リポジトリ

University of Miyazaki Academic Repository

小規模太陽集熱装置を用いた空気および熱電発電モジュールの加熱特性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): Concentrated solar heat, Fresnel lens, Compressed-air engine, Thermoelectric generation 作成者: 石津, 智子, 中尾, 晃輔, 田島, 大輔, 友松, 重樹, 林, 則行, Ishitsu, Tomoko, Nakao, Kousuke メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/5891

小規模太陽集熱装置を用いた空気および 熱電発電モジュールの加熱特性

石津 智子^{a)}・中尾 晃輔^{a)}・田島 大輔^{b)}・友松 重樹^{c)}・林 則行^{d)}

Thermal Characteristics of a Small-scaled System of the Concentrated Solar Heat Used for Heating Compressed Air Flows and Thermo-electric Generators

Tomoko ISHITSU, Kousuke NAKAO, Daisuke TASHIMA,
Shigeki TOMOMATSU, Noriyuki HAYASHI

Abstract

We have studied two concentrating solar power generation using a Fresnel lens. Firstly, we have investigated the possibility of system using a high temperature compressed-air engine as the steam turbine of the concentrating solar power generating system. Secondly, the sunlight and solar heat is doing the production of systems that use complex.

In this paper, we investigate the basic characteristic of the two concentrating solar power generation. In the study using the compressed air engine, it was produced and basic characteristic investigation of the heating unit for the air heating. The basic properties investigation of the heating unit for the air heating were confirmed an increase in the saturation temperature and the heat exchange rate by the improvement of the heating unit.

Thermoelectric generation system is being developed as a primary step to construct combined power generation system using photovoltaic and solar heat. Therefore, two thermoelectric module were developed and the basic property data was investigated.

Keywords: Concentrated solar heat, Fresnel lens, Compressed-air engine, Thermoelectric generation

1. はじめに

本学では、昨年度から「低炭素社会を目指す宮崎大学太陽エネルギー活用プロジェクトー日本屈指の日照時間を誇る宮崎で太陽エネルギー活用に関する教育研究拠点を「目指すー」を立ち上げ、再生可能エネルギーを利用した太陽熱利用分野の研究に着手している。著者らは本プロジェクトの一環として、集光型太陽熱発電システム（CSP: Concentrating Solar Power system）の開発を行っている。現在、太陽熱発電で使用される原動機としては、太陽熱で生成した水蒸気でタービンを回す蒸気タービン方式や太陽熱で直接加熱することで高温側と低温側の温度差を利用して動力を得るスターリングエンジンなどが用いられている^{1,2)}

今回は太陽熱で高温電極部を加熱する熱電発電システムおよび、高温に加熱した圧縮を用いる圧縮空気エンジンを原動機とする太陽熱発電システムという二種類の発電システムに適用する加熱部について検討を行った。

この加熱部の設計に必要なデータを収集するために、今回はフレネルレンズを用いた小規模な太陽集熱装置を製作し、その中に配置した圧縮空気加熱部の加熱特性や、熱電発電システムの発電特性の実測を行った。

本稿では、以下の2つの調査結果を報告している。

- ① 太陽熱利用のための集光型空気加熱部の製作及び基礎特性の調査
- ② フレネルレンズを用いた熱電発電の基礎特性調査

2. 集光装置

本実験で使用するフレネルレンズ式太陽集光装置の概略図を図1、全体図を図2、集熱部の模式図を図3に示す。今回は手で太陽を追った。

フレネルレンズ(日本特殊光学樹脂株式会社製)は 1050 mm × 1400 mm × t3 mm, 焦点距離 1200 mm, 材質はPDMAである。レンズは4辺を20 mm角のアルミフレームに設けられた幅6 mmの溝に入れ、厚さ3 mmのパネルランプを入れて挟むことにより、固定を行っている。また、フレネルレンズの焦点の集光面積は約 13 cm², 温度は約 1400 °Cである。目的とする温度はこの温度よりも低い

a)電気電子工学専攻大学院生

b)福岡工業大学助教

c)工学教育研究部助教

d)工学教育研究部教授

で、加熱部の設置位置は焦点からレンズの方向に L 離れた距離に熱電発電器や空気加熱装置を配置した。

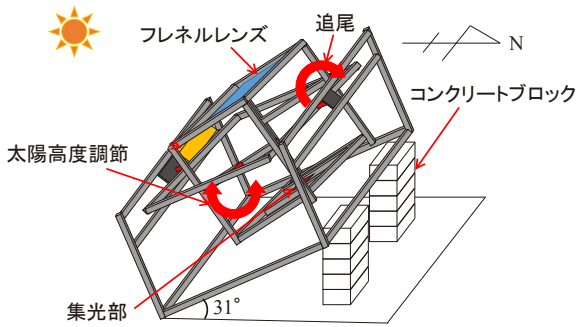
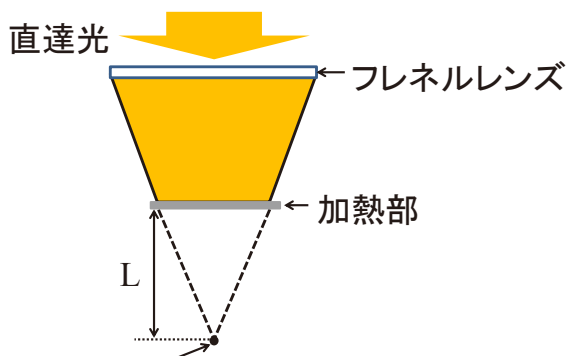


図1 フレネルレンズ式太陽集光装置の概略図



図2 集光装置の全体図



焦点(焦点の温度: 1400°C, 集光面積: 約13cm²)

図3 集熱部の模式図

3. 空気の太陽熱加熱特性

3.1 実験装置

3.1.1 加熱部の製作

完成した加熱部を図4に示す。加熱部の構造はアルミニウムプレート2枚(230mm×230mm)に空気の流路を作り、プレートを重ねてボルトで固定した。流路形状は正方

形とし、外側よりも中心部分のほうが高温になると予想されるため、外側から中心部へと空気を流すように受光面側に溝加工した。受光面積は175mm×175mm、流路断面積は15mm×15mmとし、コンプレッサーを繋ぐ配管との接続口を設けた。また流路の断面積は通過する流路内の空気の熱量の輸送量が比較的高い状態となる乱流域となるようにした。

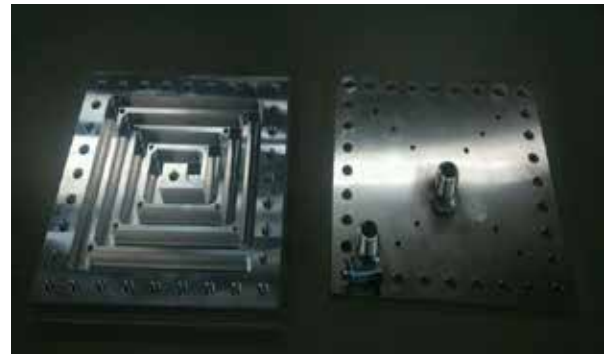


図4 完成した加熱部(左:受光面 右:底面)

3.1.2 装置構成

装置構成を図5に示す。空気はコンプレッサーを使用して作る。このコンプレッサーで送られた空気は、ウォーターセパレーター(SMC株式会社製 AMG350C-03D 使用圧力0.05~1.0MPa 定格流量1500L/min)を通り、レギュレーター(トラスコ中山株式会社製 TP-3RTOFGB-10 ろ過精度5μm 設定圧力0.05~0.85MPa)で圧力を調節した後、加熱部を通して大気中に放出される。空気の体積流量はマスフローメータを使用して測定した。また、加熱部内温度、吸気温度、排気温度測定するための計測器が設置されている。図6に温度計測器の設置概要図を示す。吸気温度計はマスフローメータと加熱部との間に設置し、加熱部内温度計は加熱部の中心部付近の温度を測るため底面の裏側中心部付近から受光面側に差込み、排気温度計は加熱部から排出直後の温度を計測するように排気口近くに設置した。また温度を測定する計測器としてK型熱電対(株式会社 OMRON 製 シース形熱電対 E52-CA15A 温度範囲0~+900℃)を使用する。

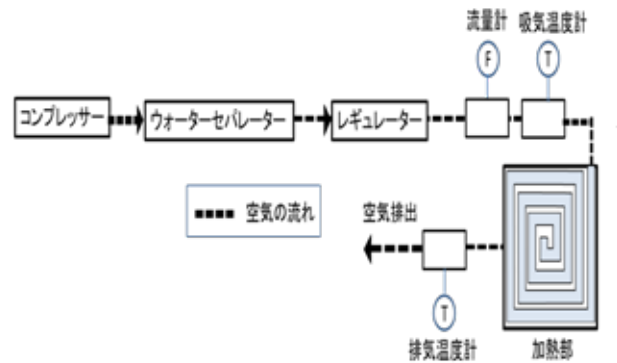


図5 装置構成図

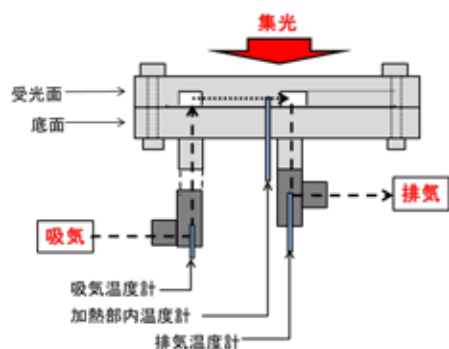


図6 温度計測器の設置概要図

3.2 実験方法

3.2.1 加熱部内温度の飽和温度調査

実験は太陽光が雲で遮られない快晴時に行い、以下の3種類の加熱部で実験を行った。

- ① 無加工の加熱部 (2015年12月18日, 気温 19.5℃)
- ② 受光面を黒色塗装した加熱部 (2016年12月25日, 気温 18.5℃)
- ③ 断熱材をもちいて断熱加工をした加熱部 (2016年1月20日, 気温 13.2℃)

実験は3種類の加熱部において、それぞれ空気を流さない状態で行った。そして集光開始から10秒刻みで1時間の加熱部内温度の時間変化をデータロガーで計測し、各加熱部の飽和温度を調査した。またフレネルレンズのレンズ面積は 1.47 m² であり、加熱部を集光装置の焦点から 15 cm の位置に設置した。また測定時の法線面直達日射量のデータと比較することで各改良における集熱効果、断熱効果の上昇を調査した。

3.2.2 空気流入時の温度、流量の時間変化

次に加熱部の温度が飽和した状態で加熱部にコンプレッサーで空気を送り、加熱部内温度、吸気温度、排気温度、体積流量の各時間変化をデータロガーで10分間計測した。また、測定時の法線面直達日射量の値から太陽の入射エネルギーを算出し、空気が加熱部を通過する間にもらったエネルギー量と比較することで加熱部の熱交換効率を算出する。また熱効率の算出には以下の式を用いた。

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100$$

η : 熱交換率[%]

Q_{in} : 太陽の入射エネルギー[W]

Q_{out} : 空気が加熱部からもらったエネルギー量[W]

本実験では熱交換率の算出により数値が安定した時間から測定終了までの単位時間あたりの平均熱交換率と、

測定開始からの総熱交換率を算出した。また、このときの Q_{in} , Q_{out} は以下の式で求める。

$$Q_{in} = E_d \times A$$

$$Q_{out} = m \times d \times c \times \Delta T$$

E_d : 直達日射量 [W/m²] m : 平均体積流量 [L/min]

A : レンズ面積 [m²] d : 空気密度 [kg/m³]

c : 空気比熱 [J/g·K]

また、本実験で使用したフレネルレンズのレンズ面積は $A=1.47$ m²、標準状態における空気密度は $d=1.293$ kg/m³、空気比熱は $c=1.006$ J/g·K である。

3.3 実験結果

3.3.1 加熱部内温度の飽和温度調査結果

各改良における飽和温度調査の結果を図7に示す。無加工の状態の加熱部(青線)を使用した加熱実験の飽和温度は完全に飽和に至らなかった。これは加熱部の側面、底面から外気へ熱放出による熱損失が大きかったこと、受光面の散乱の影響が考えられる。また最高温度は 275.5℃ となり、平均直達日射量は 978.7 W/m² となった。

受光面を黒色塗装した加熱部(黒線)を使用した加熱実験の温度上昇は無加工の場合と異なり測定開始から約 40 分経過後、280℃ 付近で飽和状態に近くなった。また最高温度は 280.5℃ となり、平均直達日射量は 783.4 W/m² となった。無加工の場合と比較すると少ない日射量でも同等の温度を記録したことで、黒色塗装による集熱効果の向上となったことがわかった。

断熱加工をした加熱部の温度上昇は約 45 分後、350℃ 付近で飽和状態に近くなった。また無加工、黒色塗装の加熱部に比べ温度上昇の立ち上がり早い。これは断熱加工による効果で熱損失が黒色塗装のときに比べ少なくなったことが要因と考えられる。また最高温度は 361.8℃ となり、平均直達日射量は 948.9 W/m² となった。よって、集熱加工、断熱加工をしたことで入射エネルギーをより吸収し飽和温度の上昇につながった。

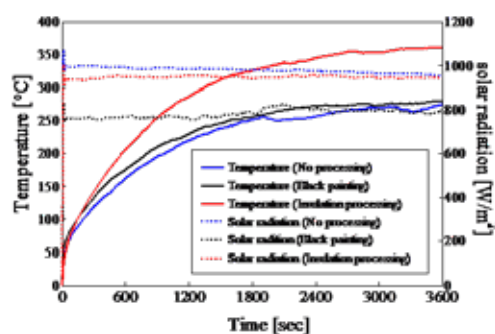


図7 飽和温度に与える黒塗装・断熱処理の影響

3.3.2 空気流入時の温度、流量の時間変化

各改良における空気流入時における各温度と日射量の時間変化を図8, 体積流量の時間変化を図9に示す. 各温度と日射量, 体積流量の傾きから同様の時間変化による加熱特性となることがわかった.

また測定結果より入射エネルギー Q_{in} , 空気が加熱部からもらったエネルギー総量 Q_{out} より単位時間当たりの平均熱交換率と総熱交換率を算出した. 算出結果を表1に示す. 算出結果より無加工の加熱部の平均熱交換率は13.1%, 総熱交換率は12.1%となった. また黒色塗装した加熱部の平均熱交換率は16.2%, 総熱交換率は15.5%, 断熱加工した加熱部の平均熱交換率は19.8%, 総熱交換率は18.4%となり, 断熱加工を施した加熱部の平均熱交換率は無加工の加熱部の平均熱交換率に比べ6.7%, 総熱交換率は6.3%上昇したことがわかった.

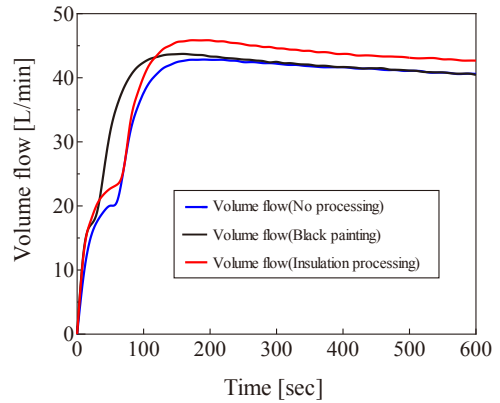


図9 体積流量の時間変化

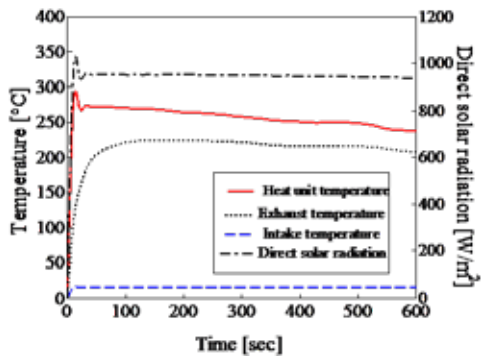
表1 平均熱交換率と総熱交換率

	無加工	黒色塗装	断熱加工
平均効率[%]	13.1	16.2	19.8
総効率[%]	12.1	15.5	18.4

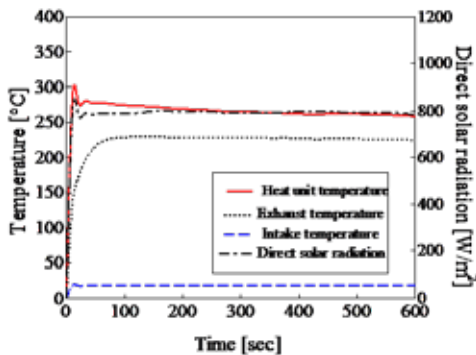
4. 太陽熱を高温熱源とする熱電発電システムの開発

4.1 熱電発電モジュールの作製

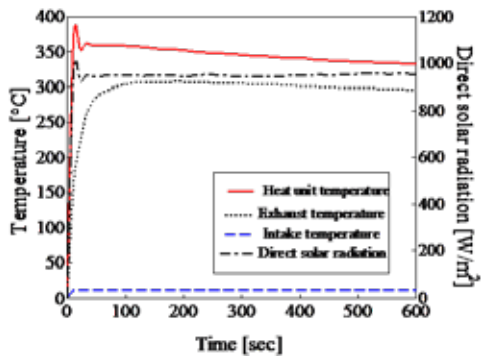
本実験で製作する熱電発電モジュールは, 熱電素子1個(フェローテック社製 ハイパワーサーモモジュール 9501/242/160B), アルミニウムプレート2枚(90mm×90mm), 温度計(オムロン株式会社製 E52-CA15AY)×2, ねじ×4, 断熱ゴム×4を用いて作製した. 熱電発電モジュールの構成部品を図10に示す. なお, アルミニウムプレートの厚さは高温側が8mm, 低温側は15mmで低温側には冷却水を流すための穴(直径6mm)を掘削した. また, ねじを伝って高温側から低温側に熱が移動することを防ぐためにねじとアルミニウムプレートとの間に断熱ゴムを挟んでいる.



(a)無加工



(b)黒色塗装



(c)断熱加工

図8 温度と日射量の時間変化



図10 熱電発電モジュールの構成部品

また、完成した熱電発電モジュールを図 11 に、熱電発電モジュールの断面図を図 12 に示す。受光面側のアルミニウムプレートを高温側、冷却水用水路を設けた方を低温側とし、両側のアルミニウムプレートと熱電素子のセラミックスの間に図 3.3 のように温度計を挟んだ。



図 11 完成した熱電発電モジュール

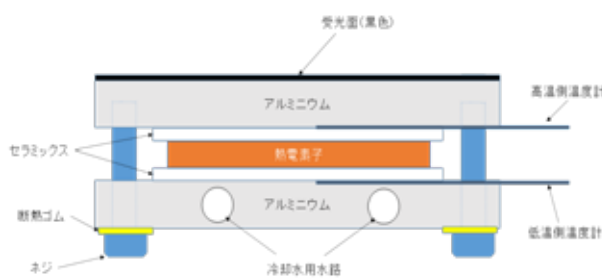


図 12 熱電発電モジュールの断面図

ールの設置位置（以下ステージ）に熱電発電モジュールを乗せ、ステージを計測する位置に移動させて行う。計測は図 13 のように焦点から上に $L = 10 \text{ cm}$, 15 cm , 20 cm , 25 cm の位置で行い高温側、低温側の温度、水温、出力電圧をデータロガー（グラフテック株式会社製 midi LOGGER GL-220）で 10 秒ごとに測定する。フレネルレンズの遮光カバーを外すと同時に計測を開始し、温度の上昇がなく、飽和したと判断した場合に計測は終了とする。さらに、計測値と以下の式から温度差を計算した。

$$\Delta T = T_H - T_L \cdot \cdot \cdot (1)$$

ΔT : 温度差 [K]

T_H : 高温側温度 [°C]

T_L : 低温側温度 [°C]

また、熱電発電モジュールの耐熱温度が 200 °C となっているため、熱電発電モジュールの安全を考慮し測定中 190 °C を超えた場合は測定を中止することとした。

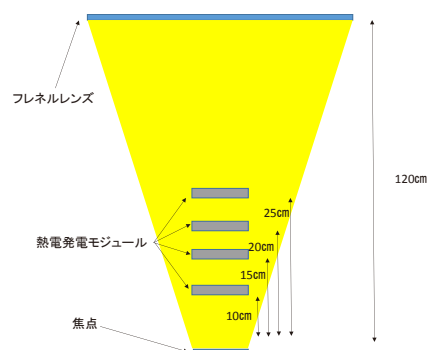


図 13 熱電発電モジュールの設置位置

4.2 フレネルレンズを用いた加熱実験

4.2.1 実験目的

今回製作した熱電発電モジュールは、受光面積 81 cm^2 、耐熱温度 200 °C となっている。これに対し、本実験で使用するフレネルレンズ式太陽集光装置は 2 章で述べるように、焦点の集光面積約 13 cm^2 、温度約 1400 °C となっている。そこで、焦点での発電は不可能と考え、フレネルレンズの焦点距離 120 cm の間に熱電発電モジュールの高温側の温度が約 200 °C となる位置があると考えられる。そこで、本節では実際に制作した熱電発電モジュールをフレネルレンズ式太陽集光装置へ設置し、実験により設置位置を検討していく。

4.2.2 実験方法

本実験では熱電発電モジュールの低温側にある冷却水配管にポンプ（寺田ポンプ製作所 SL-52）を用いて水を循環させ冷却し、高温側はフレネルレンズ式集光装置で集光した光で加熱を行う。なお、計測方法は熱電発電モジュ

4.2.3 実験結果

図 14 に焦点からの距離 $L = 15 \text{ cm}$, 20 cm , 25 cm の高温側、低温側の温度の計測結果を比較したグラフを示す。なお、焦点からの距離 10 cm の位置では加熱開始から数分で 200 °C を超えてしまったため、計測は不可能であった。グラフから高温側は 25 cm が 100 °C 前後、 20 cm が 140 °C 前後、 15 cm が 180 °C 前後となった。また低温側は 25 cm が 35 °C 前後、 20 cm が 40 °C 前後、 15 cm が 45 °C 前後で安定した。

また、図 15 に焦点からの距離 15 cm 、図 16 に焦点からの距離 20 cm 、図 17 に焦点からの距離 25 cm の出力電圧の経時変化の計測結果を示す。出力電圧が一番大きいところを見ると、焦点からの距離 15 cm で温度差 129.1 K の時、電圧 9.95 V 、焦点からの距離 20 cm で温度差 84 K の時、電圧 7.44 V 、焦点からの距離 25 cm で温度差 64.5 K の時、電圧 5.85 V となった。また、温度、電圧ともに計測開始から約 200 秒 程度で安定した。

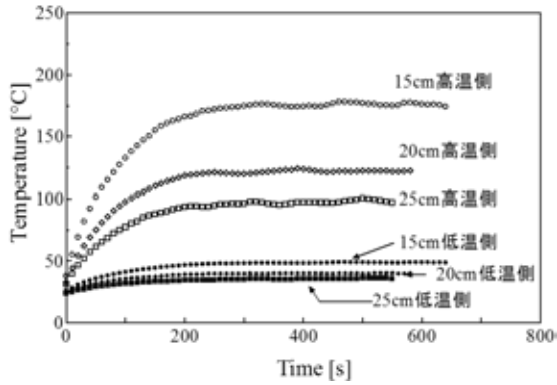


図 14 焦点からの距離とモジュール温度の関係

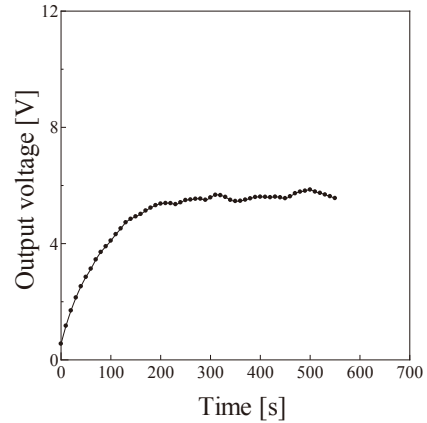


図 17 出力電圧 (L = 25 cm)

4.3 熱電素子 4 個を用いた熱電発電モジュール

4.3.1 熱電発電モジュールの大きさの検討

第三章で焦点からの距離 15 cm の集光面積は約 230 cm² となることが分かった。また熱電素子 1 個の大きさが 6 mm×6 mm であるため、今回は図 18 のように、熱電素子縦横 2 個ずつの計 4 個を使用し 145 mm×145 mm のアルミニウムプレートで挟むこととした。

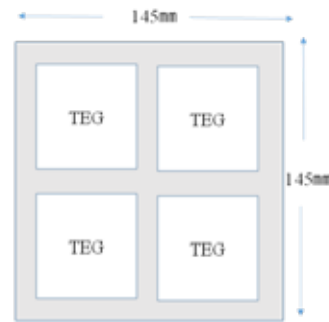


図 18 熱電発電モジュール内の素子の配置図

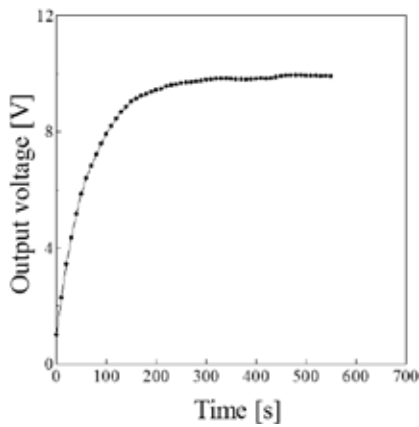


図 15 出力電圧 (L = 15 cm)

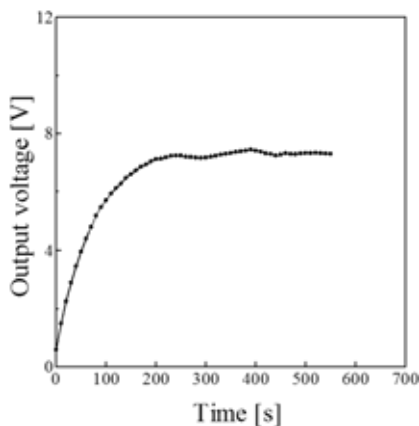


図 16 出力電圧 (L = 20 cm)

4.3.2 熱電発電モジュールの製作

本実験で製作する熱電発電モジュールは、熱電素子 4 個 (フェローテック社製ハイパワーサーモモジュール 9501/242/160B)、アルミニウムプレート 2 枚(145 mm×145 mm)、温度計 (E52 - CA15AY) ×5、ねじ×8、断熱ゴム×8 を用いて作成した。なお、アルミニウムプレートの厚さは高温側が 8 mm、低温側は 15 mm で低温側には冷却水を流すための穴 (直径 6mm) を掘削した。ただし、冷却水路は 4 本掘削した。温度計は 高温側に 4 個、低温側に 1 個を用い、アルミニウムプレートに温度計を挟むための溝を掘削した。

なお、ねじを伝って高温側から低温側に熱が移動することを防ぐためにねじに断熱ゴムを挟んでいる。完成した熱電発電モジュールの外観は図 12 と同じとなっている。

受光面側のアルミニウムプレートが高温側、冷却水路を設けた方を低温側とし両側のアルミニウムプレートと熱電素子のセラミックスの間に温度計を挟んだ。

4.4 フレネルレンズを用いた加熱実験

4.4.1 実験目的

今回製作した熱電発電モジュールは、三章の実験結果と焦点から 15 cm の位置の集光面積が約 230 cm² であるこ

とを踏まえて、熱電素子縦横 2 個ずつの計 4 個を使用し 145 mm×145 mm のアルミニウムプレートで挟むことで、受光面積約 230 cm² のものを製作した。製作した熱電発電モジュールを焦点から L = 15 cm の位置に設置し、熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールの高温側、低温側の温度を比較、検討することを目的とする。

4.4.2 実験方法

本実験では熱電発電モジュールの低温側にある冷却水用水路にポンプ（寺田ポンプ製作所 SL-52）を用いて水を循環させ冷却し、高温側はフレネルレンズ式集光装置で集光した光で加熱を行う。なお、計測方法は熱電発電モジュールを図 13 中の焦点から 15cm の位置に設置し、高温側、低温側の温度、水温、出力電圧をデータロガー（グラフテック株式会社製 midi LOGGER GL-220）で 10 秒ごとに測定する。フレネルレンズの遮光カバーを外すと同時に計測を開始し、温度の上昇がなく、飽和したと判断した場合に計測は終了とする。さらに、計測値と(1)式より温度差を計算した。

また、熱電発電モジュールの耐熱温度が 200 °C となっているため、熱電発電モジュールの安全を考慮し測定中 190°C を超えた場合は測定を中止することとした。

4.4.3 実験結果

熱電発電モジュールの高温側、低温側の温度の時間変化を図 19 に、出力電圧の時間変化を図 20 に示す。図 20 より、高温側の温度は 140 °C 程度で安定し、低温側は 40 °C 程度で安定した。また、出力電圧は最大で 23.1 V となり、温度、電圧ともに 240 秒程度で安定した。

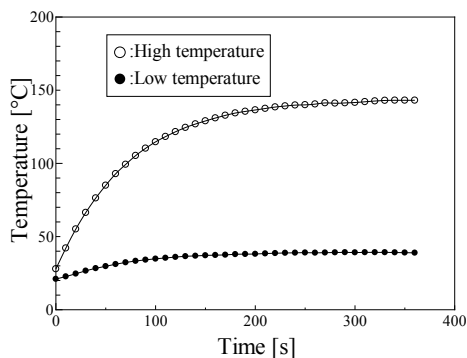


図 19 モジュール温度の時間変化

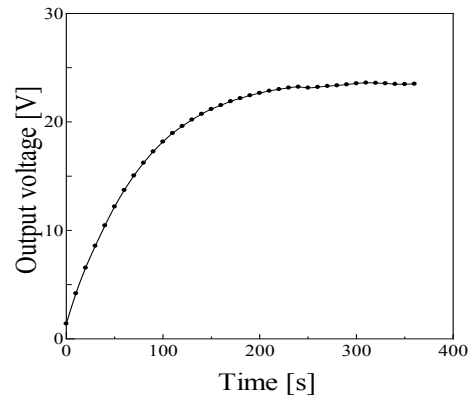


図 20 出力電圧の時間変化

4.4.4 熱電素子 1 個を用いたモジュールとの温度比較

図 21 に設置位置 L = 15 cm における、熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールと熱電素子 4 個を用いた熱電発電モジュールの高温側の測定値の比較を示す。熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールを焦点から 15 cm の距離に設置して温度を測定したが、高温側の温度は 180 °C 程度で安定した。しかし、今回製作した熱電素子 4 個を用いた熱電発電モジュールを同じ高さに設置すると、高温側の温度は 140 °C 程度までしか上昇しなかった。

原因としては、以下の 2 つが考えられる。

- ① 光の集光密度のむら
- ② 日射量の違い

1 つ目の光の密度の違いについて検討する。図 22 に熱電素子 4 個を用いた熱電発電モジュールと熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールを焦点から 15cm の位置に設置した時の集光部の様子を示す。この図を見ると熱電素子 4 個を用いた熱電発電モジュールに集光された光は、中心から離れるほどに暗くなっており、レンズの集光の仕方には、むらがあることが確認できる。また、熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールの集光部の様子からは、熱電発電モジュールに光の集光密度が高い部分が主に使われており、むらが少ないことが確認できる。二つの実験を比較すると熱電素子を 4 個用いた熱電発電モジュールは受光板に温度差が生まれ、平均すると熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールを単純に 4 倍した出力とはならなかったことが考えられる。

次に、日射量の違いについて検討する。熱電素子 1 個と熱電素子 4 個を用いた熱電発電モジュールの実験を行った日はそれぞれ 2015 年 10 月 14 日と 2015 年 12 月 8 日に行ったため、1 か月以上の間隔が開いた。よって、日射量の違いが発生したと考えられる。実験を行った時間の 10 秒毎の直達日射量をグラフに表したものを図 23 に示す。図

23 の日射量のデータから、熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールのフレネルレンズを用いた加熱実験を行った時間の平均直達日射量は 947.79 W/m^2 となった。一方、熱電素子 4 個を用いた熱電発電モジュールのフレネルレンズを用いた加熱実験を行った時間の平均直達日射量は 877.49 W/m^2 となった。このことから、熱電素子 1 個を用いた熱電発電モジュールの実験を行った日の方が、日射量が大きいことがわかる。よって温度が下がった要因として日射量の減少が 1 つと分かった。

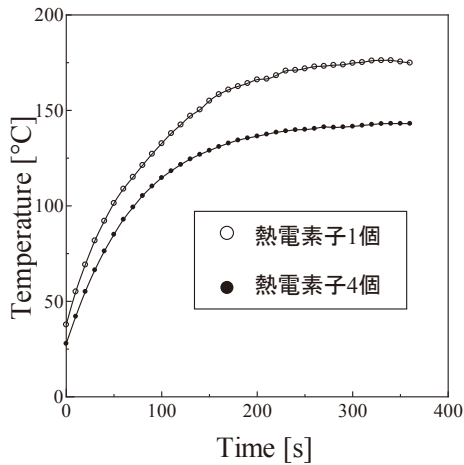
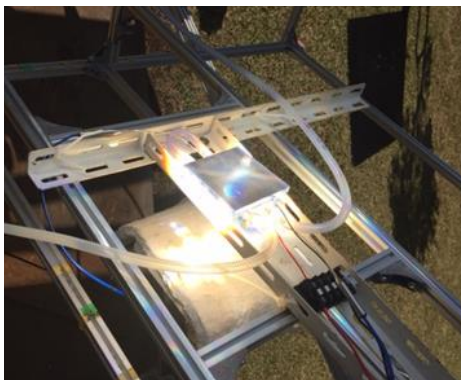
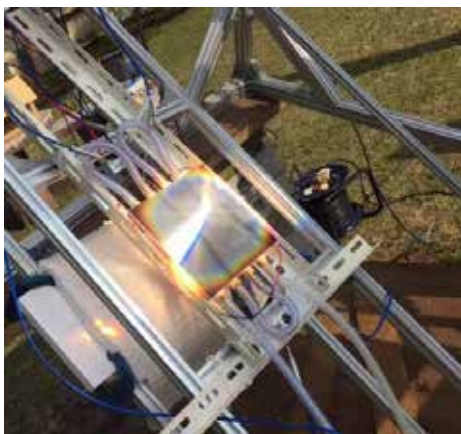


図 21 高温側の測定値の比較



(a) 熱電素子 4 個



(b) 熱電素子 1 個

図 22 集光部の様子の比較

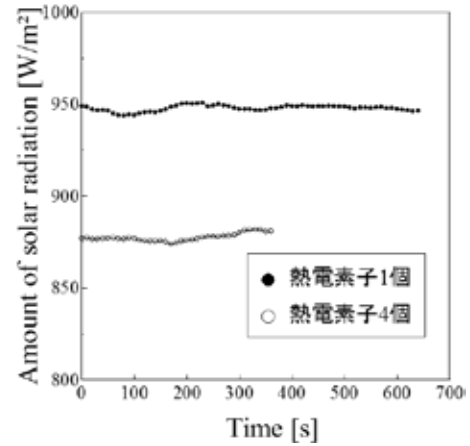


図 23 日射量データの比較

5. まとめ

今回、二つの集光型太陽熱発電の基礎特性について調査を行った。結果、圧縮空気を用いた実験では、加熱部の集熱、断熱加工による飽和温度の上昇と空気流入時における熱交換率の上昇を確認できた。熱電モジュールの実験では、太陽光と太陽熱を複合利用するシステムを製作するために、2種類の熱電発電モジュールを作製し、その基礎特性の評価を行うことが出来た。

謝辞

本研究は文科省特別研究「低炭素社会を目指す宮崎大学太陽エネルギー活用プロジェクト」(研究代表:宮崎大学教授・金子宏)の分担研究として行った。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 森北出版「NEDO 再生可能エネルギー技術白書第 2 版」(2014) 第 5 章太陽熱発電・太陽熱利用
- 2) 日本太陽エネルギー学会「新太陽エネルギー利用ハンドブック」(2010) 第 II 編太陽エネルギー直接利用技術 第 3 章太陽熱の動力化システム