

## ビームダウン式太陽集光装置のための固体攪拌型蓄熱装置の改良

前田 順登<sup>a)</sup>・長瀬 慶紀<sup>b)</sup>・友松 重樹<sup>c)</sup>・安在 晋太郎<sup>d)</sup>・木村 正寿<sup>e)</sup>

## Improvement of a Particle Receiver for a Beam-down Solar Concentrator

Naoto MAEDA, Yoshinori NAGASE,  
Shigeki TOMOMATSU, Shintaro ANZAI, Masatoshi KIMURA

## Abstract

In 2012, a beam-down solar concentrator was installed in the University of Miyazaki. A particle receiver for the beam-down solar concentrator was developed in this laboratory. This study aims to increase temperature and improve the heat storage efficiency of the developed receiver. In general, a receiver heats heat mediums such as steam, molten salt, or air. The heated mediums are sent to generation systems such as steam turbines and/or heat storage systems. Alumina balls are used as heat mediums for the receiver; they are heated directly by sun light, and they store this thermal energy as sensible heat. Experiments were conducted using the beam-down solar concentrator with the compound parabolic concentrator (CPC) and the particle receiver. This study revealed that the heating medium was heated up to 1570°C using the receiver. It was found that the quartz glass was effective in reducing heat loss, but the enclosure proved to be less effective. The temperature distribution depended on the distance from the CPC. It was also observed that the distance between the CPC and the receiver does not affect the heat storage efficiency significantly.

**Keywords:** Solar receiver, Heat storage, Beam-down solar concentrator, CPC

## 1. 緒論

現代社会において、エネルギーは日常生活に必要な不可欠な存在であり、産業技術が進歩し、より豊かな生活を行うためには、エネルギーの安定供給への取り組みが必要である。現在のエネルギー供給の大部分が化石燃料に頼ったものであり、化石燃料は有限であるとともに、地球温暖化や環境汚染などの原因となっている。したがって、化石燃料に頼った現状からの転換が求められている。化石燃料につぐエネルギー源として原子力があげられる。しかし、東北沖地震による原子力発電所の事故をきっかけに原子力発電のあり方が見直され、安全かつ安定したエネルギー供給に対する注目が高まってきた。現在、再生可能エネルギーの一般的なものとして水力発電や風力発電、太陽光発電があげられる。しかし、ダムを建設することによる環境の破壊や大規模な発電が困難なこと、天候や時間による変化に強く影響されるなどのデメリットも多く、世界の発電方法の大部分を占める火力発電や原子力発電の代替エネルギーとなることは難しいと考えられ、再生可能エネルギーによる天候や時間に左右されない安定的なエネルギー供給を実現させることが課題となっている。そこで、再生可能エネルギーの中でも、安定的なエネルギー供給の可能性を秘めているのが蓄熱可能な太陽熱発電であり、単位面積当たりの集光率が高く、太陽集光装置の中でも中規模から大規模のエネルギー供

給に適しているビームダウン式タワー型太陽集光装置に注目が高まっている<sup>1-2)</sup>。

本研究室では、ビームダウン式タワー型太陽集光装置のための固体攪拌型蓄熱装置の研究がおこなわれている<sup>3)</sup>。ビームダウン式タワー型太陽集光装置の一般的なレシーバでは空気や熔融塩、蒸気などの熱媒体を高温に加熱し、蒸気タービンなどの発電システムや蓄熱システムに送ることが主流である。しかし、熱交換の際に熱損失が生じることや、最高温度があまり高くないことなどの問題点がある。そこで、本研究室で開発した固体攪拌型蓄熱装置は、蓄熱材となる固体粒子を直接加熱することによって、熱交換の際の熱損失を低減し、より高温での蓄熱を可能とした。本研究室で開発した固体攪拌型蓄熱装置での発電のためにはまだデータ数が少なく、より高温で、蓄熱効率を向上させるための方法を確立させる必要がある。そこで本研究では、ビームダウン式タワー型太陽集光装置のための固体攪拌型蓄熱装置において、蓄熱槽の温度の向上と蓄熱効率の改善に向け使用条件を検討することを目的とする。

a) 工学専攻（機械・情報系コース）大学院生

b) 機械設計システム工学科教授

c) 機械設計システム工学科助教

d) 工学専攻（機械・情報系コース）大学院生

e) 教育研究支援技術センター技術専門員

## 2. 実験装置

### 2.1 ビームダウン式タワー型太陽集光装置

平成 24 年 8 月に宮崎大学に建設された三鷹光器製ビームダウン式タワー型太陽集光装置を図 1 に示す。ビームダウン式タワー型太陽集光装置は、地上に配置された複数のヘリオスタット、タワー、そしてタワー上部に設置されている楕円鏡で構成されている。ビームダウン式タワー型太陽集光装置の集光原理を図 2 に示す。太陽光はまず、地上のヘリオスタットによってタワー上部楕円鏡の第一焦点に集光される。楕円鏡は 2 つの焦点を持ち、一方を通過して入射した光を他方に集光するため、太陽光は楕円鏡の第二焦点に最終的に集光される。



図 1 ビームダウン式タワー型太陽集光装置



図 3 CPC

### 2.3 固体攪拌型蓄熱装置

本研究室で開発された固体攪拌型蓄熱装置は、光を受ける受光部と、光により加熱された熱を蓄熱する蓄熱槽とが一体となった装置である。固体攪拌型蓄熱装置は、上部の蓄熱槽と下部の駆動部から構成される。図 4 に固体攪拌型蓄熱装置を示す。受光部、駆動部の説明を以下に示す。



図 4 固体攪拌型蓄熱装置

#### 2.3.1 駆動部

駆動部は 3 台のステッピングモーターの回転を 4 つの平歯車に伝える。平歯車に伝わった回転は平歯車の中心に取り付けてある台形ネジへと伝わりピストンの上下運動へと変わる。中心の平歯車と外側の 3 つの平歯車が逆回転することで、ピストンが上下逆方向に運動する。図 5 に歯車の回転と上下運動の様子を示す。

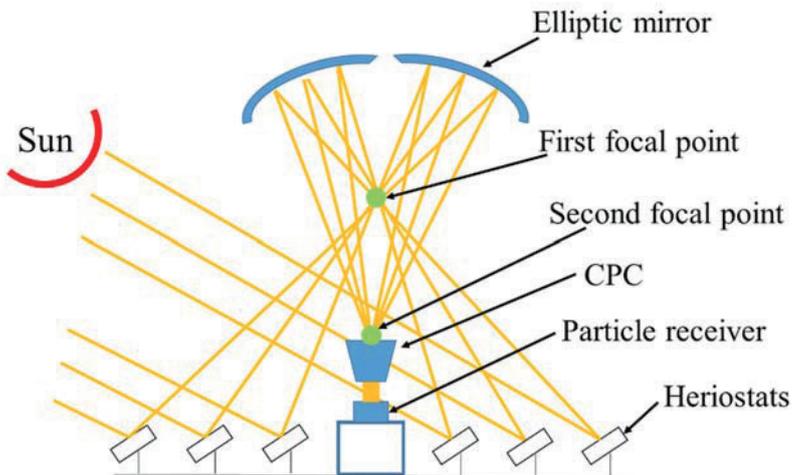


図 2 集光原理

### 2.2 CPC(Compound Parabolic Concentrator)

CPC を図 3 に示す。CPC はビームダウン式タワー型太陽集光装置楕円鏡第二焦点付近に設置され、内部が多数の鏡によって放物線形状に構成されており、ビームダウン式タワー型太陽集光装置楕円鏡によって集光された光が CPC を通過することでさらに集光が行われる。



図5 駆動部

### 2.3.2 受光部

図6に受光部・蓄熱槽の概略図を示す。受光部・蓄熱槽は二つの円筒と、二つのピストンから構成されている。外側の円筒の大きさは直径398mm、高さ450mmであり、内側の円筒の大きさは直径276mm、高さ320mmである。受光部・蓄熱槽では、内、外のピストンがそれぞれ上下逆方向に運動することにより、固体粒子のアルミナ球を攪拌することができる。今回の実験では、内ピストンを下方向に、外ピストンを上方向に運動させた状態で実験を行った。

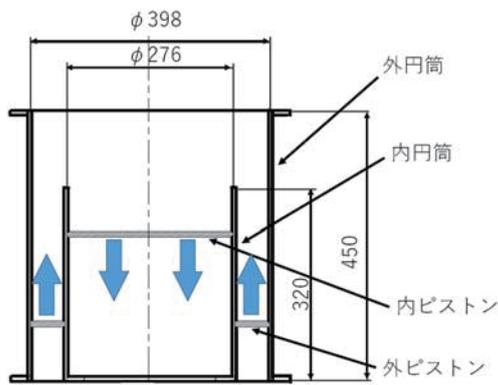


図6 受光部概略図

### 2.3.3 蓄熱材料

蓄熱材料にはアルミナ球を使用した。アルミナ球は融点が  $2015^{\circ}\text{C}$ と高く、種々の粒径のものを入しやすいう理由から蓄熱材料として使用した。また、粒径については粒径が小さいほど、アルミナ球の中心まで速く加熱されるため、小さい方が良く考えられるが、ピストンと円筒との隙間を考慮して直径5mmのものを使用した。図7にアルミナ球を示す。表1にアルミナの物性値を示す。



図7 アルミナ球

表1 物性値

蓄熱材料	アルミナ
粒径	5 mm
融点	$2015^{\circ}\text{C}$
密度 (300K)	$3.89 \text{ kg/m}^3$
比熱 (300K)	$0.779 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
熱伝導率 (300K)	$36.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

### 2.3.4 温度測定位置

図8、図9に温度測定位置を示す。温度測定は4本の熱電対で行う。熱電対の先端部は中心から50mm間隔で取り付けられている。熱電対の高さは、内円筒上端から20mmの位置である。

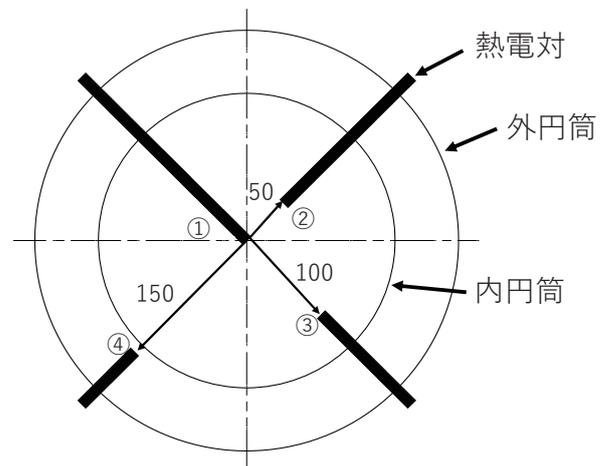


図8 熱電対取付位置

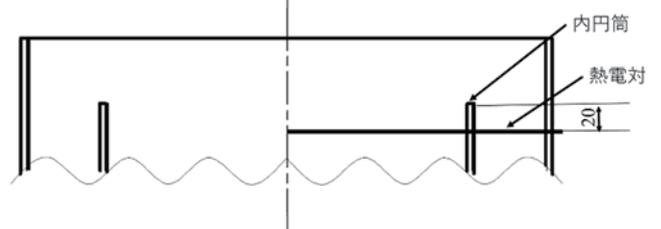


図9 熱電対取付高さ

3. 固体攪拌型蓄熱装置加熱実験

3.1 実験条件

ビームダウン式タワー型太陽集光装置, CPC, 固体攪拌型蓄熱装置を用いて蓄熱材料の加熱実験を行った. 表 2 に実験条件を示す. 実験は, 実験時間 50min, サンプリング間隔 1s, 蓄熱材質量 50kg, ストローク 150mm の条件は統一し, 4 つの実験条件で行った.

実験条件 1 と 2 を比較することで, 石英ガラスを載せることによる対流損失の低減の影響の調査を, 実験条件 1 と 3 を比較することで 囲いをつけることによる対流損

表 2 実験条件

実験条件	1	2	3	4
開始時刻	11:30	11:30	11:35	11:35
実験時間 [min]	50	50	50	50
サンプリング間隔 [s]	1	1	1	1
蓄熱材質量 [kg]	50	50	50	50
CPCとの距離 [mm]	250	250	250	150
ストローク [mm]	150	150	150	150
石英ガラス	あり	なし	あり	あり
受光部囲い	なし	なし	あり	あり

失の低減の調査を, 実験条件 3 と 4 を比較することで, CPC との距離を変えることによる影響の調査を行った.

3.2 実験結果

各実験条件の実験結果を表 3 に示す. 図 10~13 に各実験条件の温度変化の様子を, 図 14~17 に各実験条件の実験終了後の受光部内槽の温度分布を示す. 図 10~13 のグラフの縦軸は温度を, 横軸は集光開始からの時間を表しており, 図 14~17 のグラフは, 縦軸が熱電対からの距離を, 横軸が受光部内円筒の中心からの距離を表している. また, 図 18 に各実験条件の最高温度と平均温度の比較のグラフを示し, 図 19 に各実験条件の蓄熱効率と定常状態の蓄熱効率の比較のグラフを示す. 図 18 のグラフは縦軸が温度, 横軸が実験条件の番号を, 図 19 のグラフは縦軸が蓄熱効率, 横軸が実験条件の番号を示している.

ここで, 蓄熱効率とは, レシーバ受光部内槽の蓄熱量を実験中の入射エネルギーで除した値であり, 定常状態の蓄熱量とは, ch1, ch2, ch3 で計測した温度の時間的变化が 10%以内となった状態を定常状態とし, 1 秒当たりの蓄熱量を 1 秒当たりの入射エネルギーで除した値である.

表 3 実験結果

実験条件	1	2	3	4
最高温度 [°C]	1190	911	998	1570
平均温度 [°C]	468	398	268	483
理論平均温度 [°C]	1839	1835	1096	2006
蓄熱量 [MJ]	11.9	9.7	6.9	13.1
入射エネルギー [MJ]	75.2	83.5	53.4	94.0
蓄熱効率 [%]	15.8	11.6	12.9	13.9
定常状態の蓄熱効率 [%]	18.1	12.9	14.1	15.7

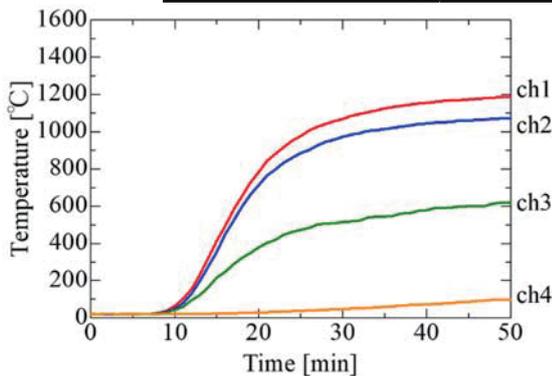


図 10 温度変化 実験条件 1

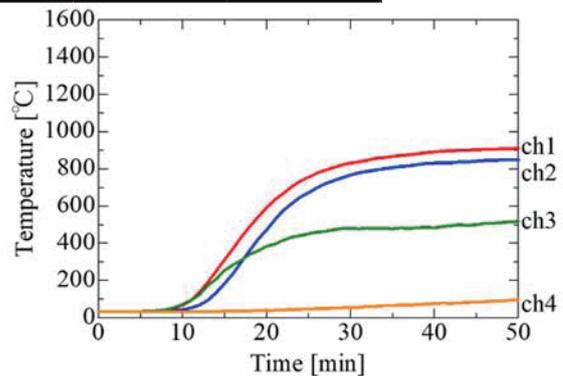


図 11 温度変化 実験条件 2

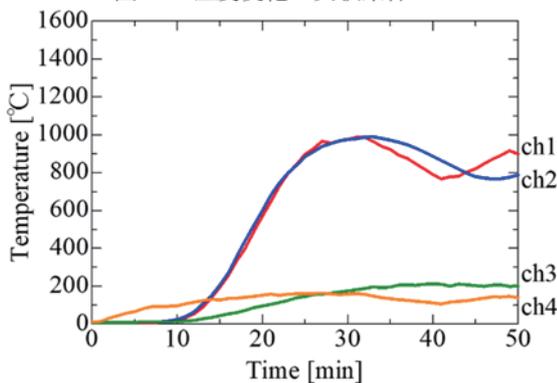


図 12 温度変化 実験条件 3

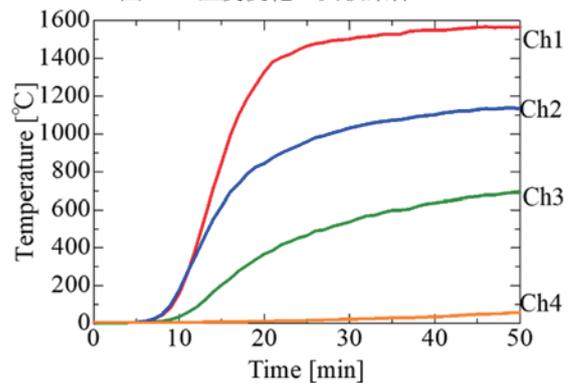


図 13 温度変化 実験条件 4

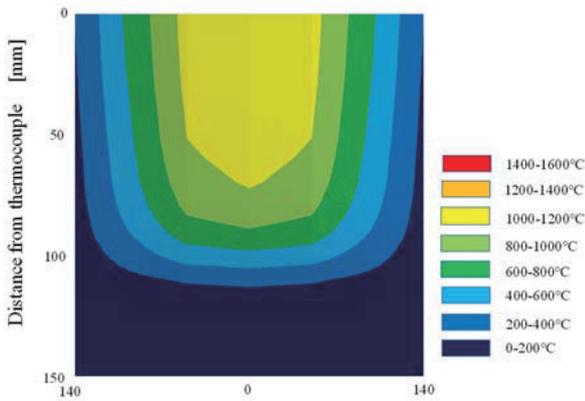


図 14 温度分布 実験条件 1

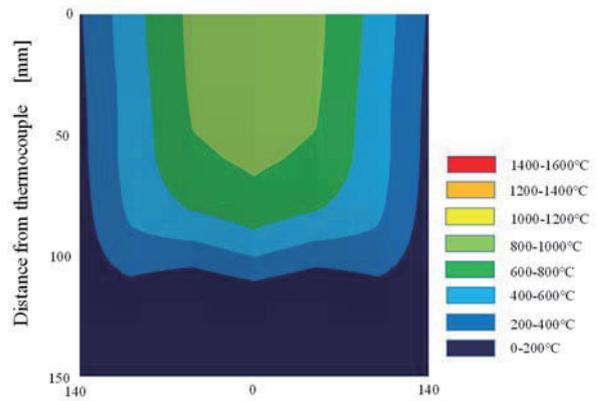


図 15 温度分布 実験条件 2

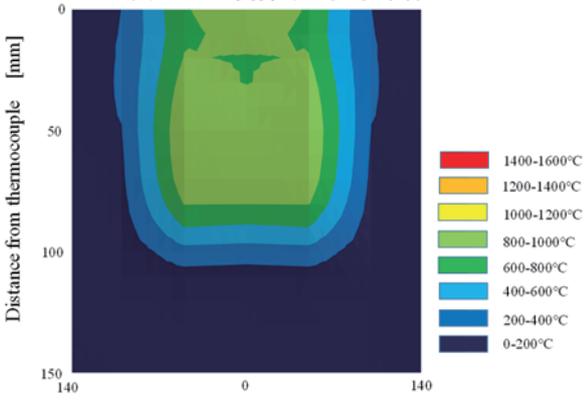


図 16 温度分布 実験条件 3

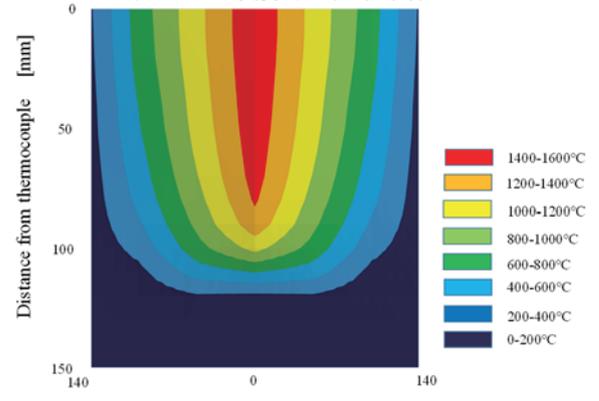


図 17 温度分布 実験条件 4

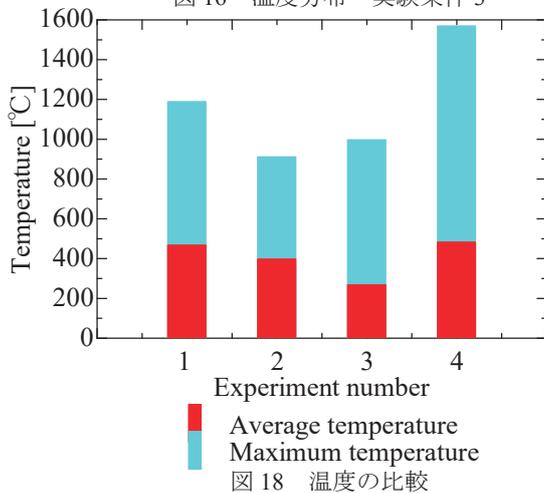


図 18 温度の比較

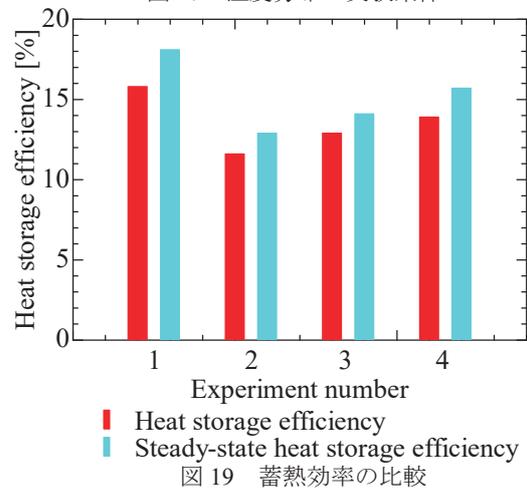


図 19 蓄熱効率の比較

### 3.3 考察

図 10~13 の温度変化のグラフから、実験開始から約 10 分間温度が上昇していないことが分かる。この理由として、熱電対が取り付けられた位置では、はじめの 10 分間は加熱されていないアルミナ球が上から順に降り、その後加熱されたアルミナ球が降りてくること、蓄熱媒体であるアルミナの熱伝導率が低いことが考えられる。

図 14~17 の温度分布の図から、レーザー受光部内槽の中心部分で集中的に加熱されていることが分かる。これは CPC の熱流束分布の影響によるものだと考えられる。図 20 に CPC との距離 250mm と 150mm の位置の熱流束分布を示す<sup>5)</sup>。図 20 に示すように熱流束は中心部分が高

く、外に行くほど熱流束の値が減少していく。そのためレーザー受光部の中心で温度が高くなり、中心から外へ行くほど温度が低くなる事が分かる。

表 3 の実験結果、図 18 の温度の比較のグラフ、図 19 の蓄熱効率の比較のグラフから、実験条件 1 と 2 を比較すると、石英ガラスを載せることで最高温度、蓄熱効率ともに向上することが分かる。これは、石英ガラスを載せることで、対流による熱損失を低減できたことによるものだと考えられる。

実験条件 1 と 3 を比較すると、受光部囲いによる影響はあまり見られないことが分かる。これは、石英ガラス

により、対流による熱損失は低減されているため、それ以上の低減の効果が見られなかったこと、レシーバは内槽と外槽の間が空気の断熱層となっているため、側面からの熱の逃げが少ないことによるものだと考えられる。

実験条件3と4を比較すると、最高温度が大幅に向上していることが分かる。これは、図20に示すようにCPCとの距離を250mmから150mmに変更したことにより、より集光倍率の高い位置で加熱ができたためであると考えられる。

4つの実験を比較すると、最高温度は、実験条件4で1570℃となり、蓄熱効率は、実験条件1で15.8%と最も高くなった。実験条件4で最も温度が高くなったにもかかわらず、蓄熱効率があまり上昇していない理由としては、CPCとの距離を150mmの位置に変更したことにより集光倍率の高い位置で加熱されたが、中心部分のみ加熱され、外側の温度があまり上昇しなかったことが原因と考えられる。高温となった中心部の体積は、内槽全体の体積と比較するととても小さいため、最高温度の差ほどの蓄熱量の上昇が見られなかった。また、図21に示すアルミナの吸収率のグラフ<sup>9)</sup>から、蓄熱材料として使用しているアルミナ球は、高温になるほど吸収率が減少する傾向がみられる。このことから、最高温度が上昇するほど蓄熱効率は低下するのではないかと考えられる。

今回の実験結果から蓄熱効率を向上させる有効な実験条件は判明しなかった。蓄熱効率が向上しなかった原因として、中心部分のみ加熱され外側の温度が上昇していなかったことが考えられる。そのため、全体が均一に加熱されるように受光部内円筒の径を小さくすること、受光部内円筒に蓋をつけることによりアルミナ球の通る位置を制限することで全体を均一に加熱するなどの対策が必要であると考えられる。

また、今回蓄熱材料としてアルミナ球を使用した、蓄熱材料にアルミナとは別の吸収率が高く、高温にも耐えることができる材料を使用することで、蓄熱効率が向上するのではないかと考えられる。

#### 4. 結論

ビームダウン式タワー型太陽集光装置のための固体攪拌型蓄熱装置で加熱実験を行うことで以下の結論を得た。

1. 実験条件4のCPC下端から受光部内槽上端までの距離が150mmの位置での加熱実験で、最高1570℃まで加熱することができることが分かった。
2. 石英ガラスは、熱損失の低減に効果があるが、囲いはあまり効果がないことが分かった。
3. 温度変化はCPCとレシーバ上端の距離に依存することが分かった。
4. CPCとレシーバとの距離を変えることは、蓄熱効率にあまり影響しないことが分かった。

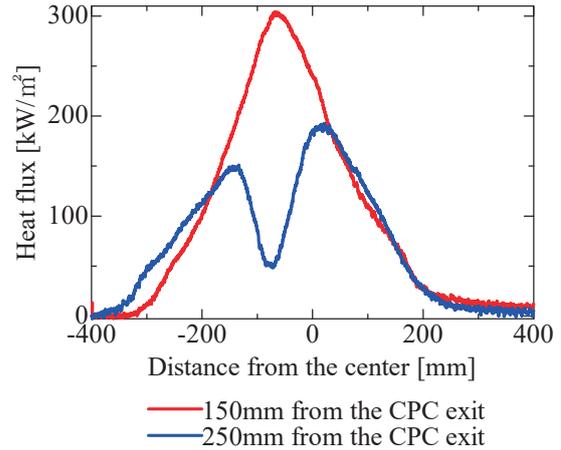


図20 CPCの熱流束分布

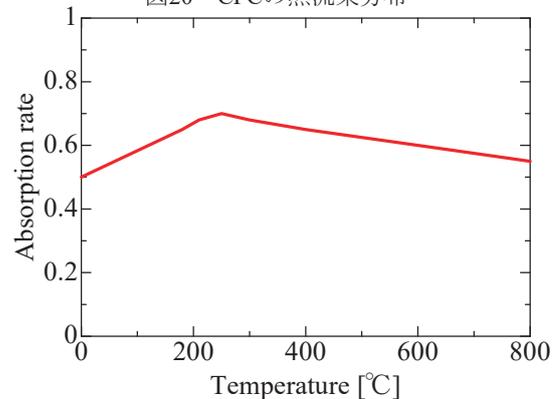


図21 アルミナ球の吸収率

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり適切な助言・サポートをしていただいた森暢彦氏、三宅琢磨氏、濱畑貴之氏に感謝の意を示します。

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構:NEDO再生可能エネルギー技術白書 第2版 ー第5章 太陽熱発電・太陽熱利用ー, 2014.
- 2) 伊藤義康, 大規模化を指向する再生可能エネルギー発電の現状(9)ー最新の集光型太陽熱発電システムの技術開発動向 その2ー, 機械の研究 第63巻 第3号, 2011.
- 3) Y.Nagase, N.Mori, S.Tomomatu, K.Matubara: "Development of Mechanical Mixing System of Sensible Heat Storage Equipment for Beam-Down Solar Concentrator", The21st National Symposium on Power and Energy systems, 2016.
- 4) 国立天文台: 理科年表 机上版, p.485, 1991.
- 5) 菊永拓馬: ビームダウン太陽集光装置集光部の二次元放射流束計測に関する研究, 平成27年度 宮崎大学修士論文, 2016.
- 6) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第5版, p.287, 2009.