

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02657

研究課題名(和文) 高効率太陽熱発電のための流動層式顕熱蓄熱 / 化学蓄熱システムの研究開発

研究課題名(英文) Research and development on sensible / chemical heat storage system using fluidized bed for efficient solar heat power generation

研究代表者

松原 幸治 (Matsubara, Koji)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20283004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、集光型ソーラー発電の高効率化に向けて高温型粒子流動層式ソーラーレシーバの研究開発を行った。最初、粒子の定常流に集光を直接照射して加熱粒子を排出する、新型の流動層式レシーバを製作し、太陽シミュレータで実験を行った。実験によって、最高634度の粒子を定常的に外部に取り出すことができた。ただし、エネルギー収支を検討したところ、粒子の流動化のために加える空気が持ち出す熱が大きな割合を占めることが判明した。このため、空気をエアレシーバで加熱し、この加熱した空気と粒子を熱交換するための二塔流動層を設計した。この二塔流動層についてはコールドモデルを作成して、安定に流動する条件を実験的に導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状の太陽熱発電所では、熔融塩を熱媒として最高560度で集熱して水蒸気タービンで発電を行っている。発電効率の向上のためには太陽集熱の温度を上げる必要があるが、熔融塩は熱分解するため高温で用いることが困難である。このような現状を踏まえて、高温でも安定な固体微粒子を集熱物質として用いることで高温型集熱を実現する基本技術について実験的に研究した。本研究によって、連続的に供給される粒子を600度以上まで集光で加熱してこれを外部に取り出すことができた。またエアレシーバと組み合わせる二塔流動層の可視化実験を行った。これらのように、高温型レシーバの実用化に繋がる知見を積み重ねたことに学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：This study conducted research and development of a high-temperature particle fluidized bed solar receiver aiming a highly efficient concentrated solar power generation. Firstly, a new fluidized bed receiver was manufactured. The receiver directly heated a particle flow and exhausted the heated particles. Such a receiver was tested using sun simulator. The experiment proved that this receiver could produce hot particles of 634 degree Celsius maximally. However, the energy budget indicated that the air, which was provided for aeration of particles, exited the receiver carrying a large amount of irradiation heat. Therefore, a two-tower type fluidized bed was designed. This fluidized bed exchanged the heat between the particle and the air flow which was heated by an air receiver. A cold-model for the two-tower type fluidized bed was fabricated to yield the flow map indicating the stable flow condition.

研究分野：熱工学、エネルギー学

キーワード：太陽エネルギー 集光型太陽熱発電 伝熱 流動層

1. 研究開始当初の背景

近年実用化した集光型太陽熱発電 (CSP) では、硝酸塩系溶融塩を用いて約 560°C で集熱が行われている。太陽熱発電を高効率化するためには集熱温度を上昇する必要があるが、このタイプの溶融塩は 600°C で熱分解することが障壁となっている。このため、各国の研究機関では高温でも安定な個体粒子を利用したパーティクルレシーバが開発されている。しかしながら、これまで開発されたレシーバは十分な集熱温度が得られておらず研究が不十分であった。

2. 研究の目的

- (1) 定常的な粒子の流れに集光を直接照射して加熱した粒子を連続的に取り出すことができる新しい定常流型流動層レシーバを研究開発する。このような流動層レシーバを設計し、実際に製作して、集光を照射したときの集熱性能や温度分布を実験的に測定する。
- (2) 太陽集光を取りこむ集熱器とその熱を粒子に伝える流動層熱交換器を分離したシステムについても研究する。このようなシステムの流動層熱交換器について流動特性を実験的に把握し、その性能改善のための知見を集積する。

3. 研究の方法

(1) 定常流型流動層レシーバの研究では、1kWth 集光型太陽シミュレータを熱源として加熱実験を行う。図 1 は実験装置の概要である。太陽シミュレータは、6kWth のキセノンランプと楕円反射鏡を組み合わせ直径 1cm のスポットに約 1kWth の集光を照射する。定常流型流動層レシーバにおいて、粒子としてアルミナを主成分とする個体粒子 (グリーンビーズ、直径 0.2~0.3mm、キンセイマテック社製) を用いてフィーダによって流動層内部に供給する。この粒子を分散板からの空気によって流動化し、石英窓を通して取りこんだ集光によって加熱する。加熱された粒子を堰からオーバフローさせて外部に流出する。実験は粒子供給量と空気流量を変化させて、48 通りの条件で行った。図 1 に示したように流動層内部 8 箇所と、出口空気 2 カ所で温度測定を行った。

(2) 流動層熱交換器の実験では、図 2 のようなアクリル製レシーバを作成してコールドモデルによる可視化実験を行う。(1)の実験と同じ粒子を利用して、同様な方法で流動層に供給する。

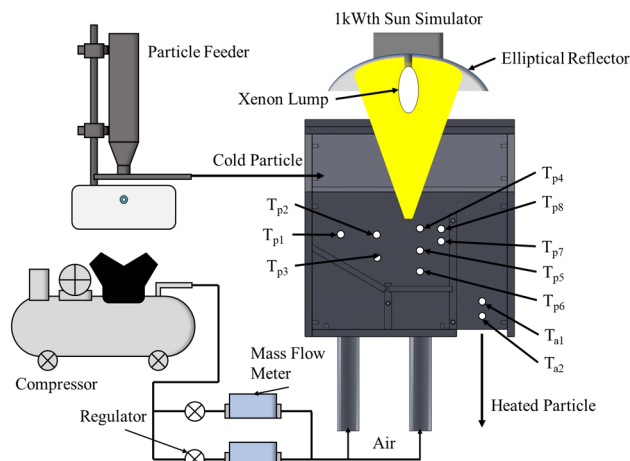


図 1 定常流型流動層ソーラーレシーバの実験装置

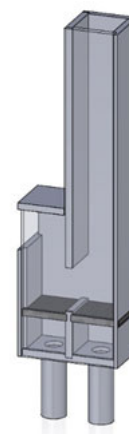


図 2 流動層熱交換器コールドモデル

4. 研究成果

(1) 定常流型流動層ソーラーレシーバの実験例として、図 3 に流動層内温度の時間変化を示す。同図は、空気流量を $M_{a1} = 15\text{L/min}$ $M_{a2} = 15\text{L/min}$ 、粒子流量を $M_p = 10.2\sim 10.5\text{g/min}$ とする条件での 3 回の実験結果を示している。同図に見るように、流動層内の温度は集光照射によって上昇し、90 分程度で最高温度に達し、その後はほぼ一定値を保っている。3 回の実験結果は概ね一致し、温度測定の再現性は良好である。

図 4 には、空気流量を $M_{a1} = 15\text{L/min}$ $M_{a2} = 15\text{L/min}$ として、粒子流量を様々に変化

させた場合の温度の変化を示す。ただし、温度の値は、210分～240分間の平均温度である。この図では、粒子流量が大きくなると温度が下がるが、粒子流量が小さいとき高い温度が得られることが示されている。特に、粒子流量を最小値に設定したとき、流動層の出口に近い地点で636°Cであった。

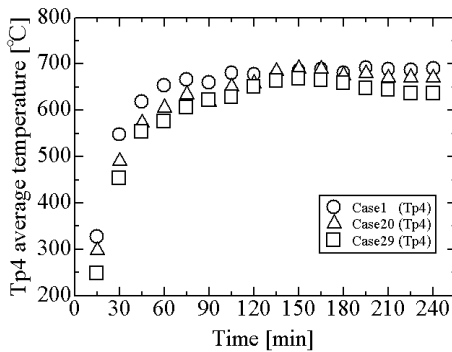


図3 流動層内温度の時間変化

$M_{a1} = 15\text{L/min}$ $M_{a2} = 15\text{L/min}$
 $M_p = 10.2\sim 10.5\text{g/min}$

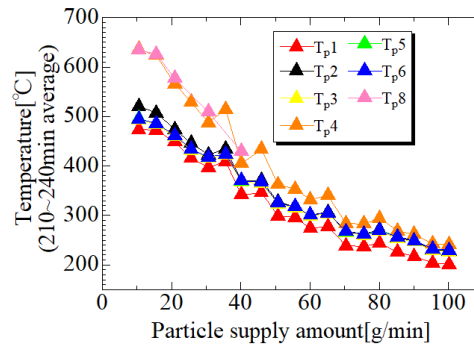


図4 流動層内温度への粒子流量の影響

$M_{a1} = 15\text{L/min}$ $M_{a2} = 15\text{L/min}$

図5には、空気流量を変化させた場合の流動層内温度の分布を示す。同図に見るように、空気流量が大きいき、流動層の下部の温度は低い。しかし、空気流量が小さくなると、流動層内部の下部の温度は上昇し、流動層内部の温度は均一化する。

図6には、集熱効率の計算例を示す。同図では、粒子の集熱効率を粒子が得た顕熱の集光照射に対する割合、空気集熱効率を空気が得た顕熱の集光照射に対する割合としてそれぞれ示し、さらに両方の和を示した。粒子の集熱効率は、空気流量を変化させても大きくは変化せず、ほぼ一定値で概ね20%である。これに対して空気の集熱効率は空気流量が大きくなると上昇して、最大30%程度である。粒子と空気の集熱効率の和は、空気流量の増加に伴って上昇し、最大で約60%程度である。

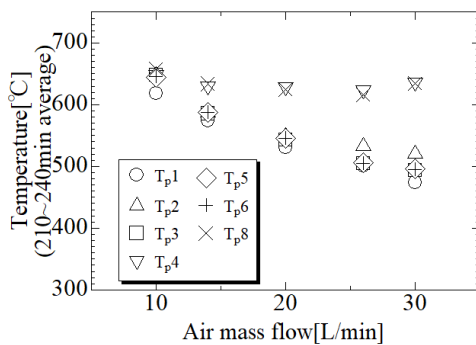


図5 粒度層内温度に対する空気流量の影響 ($M_p = 10.1\sim 10.6\text{g/min}$)

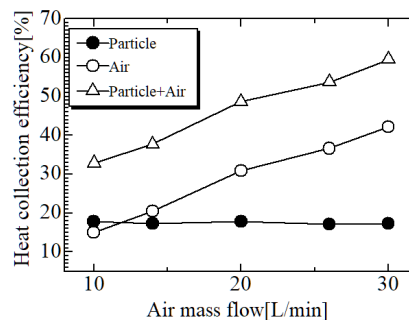


図6 集熱効率に対する空気流量の影響 ($M_p = 10.1\sim 10.6\text{g/min}$)

(2) 以上のように、定常流型流動層ソーラーレシーバの実験では600°Cを超える高温が得られたが、空気による顕熱の損失が大きいことが判明した。このため、空気集熱器と組み合わせるための流動層熱交換器の可視化実験を行った。図7は、可視化実験の結果の一例であり、フィーダから供給された粒子が安定に流動化して外部に排出されることを確認した。図8は、フローマップであり、二塔式流動層の空気流量 M_{a1} 、 M_{a2} を様々に変化させた場合の流れの様子を整理したものである。同図に見るように、二つの空気流量の和が概ね10L/minを超えるとときに安定な流動

が得られることが分かった。

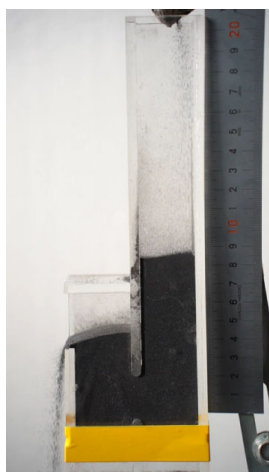


図7 可視化例

$M_{a1}=3\text{L}/\text{min}$

$M_{a2}=5\text{L}/\text{min}$

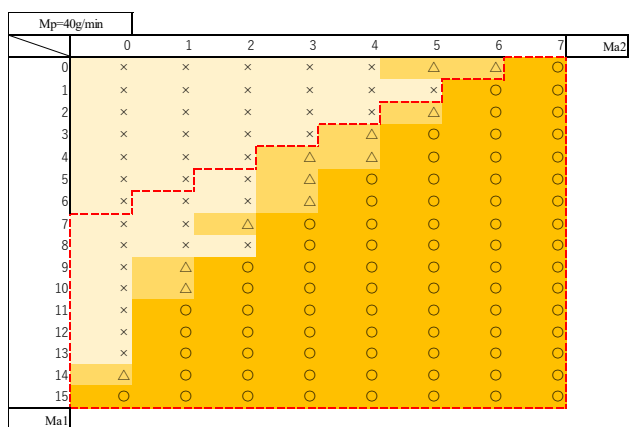


図8 フローマップ

(○安定流動、△不安定、×流動せず)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kota Kawasaki, Mitsuho Nakakura and Koji Matsubara	4. 巻 5
2. 論文標題 Conjugate simulation of solar honeycomb receiver for high temperature heat absorption at constant incident heat flux	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jtst.2020jtst0018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Mitsuho Nakakura, Koji Matsubara, Selvan Bellan, et al.	4. 巻 146
2. 論文標題 Direct simulation of a volumetric solar receiver with different cell sizes at high outlet temperatures (1,000-1,500 degrees C)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Renewable Energy	6. 最初と最後の頁 1143-1152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 萩野裕貴、松原幸治、浅川大輝、伊藤謙人、松平雄策、磯島匠
2. 発表標題 高空隙率を有する多孔質レシーバの伝熱特性
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第 58 期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松原幸治、中倉満帆
2. 発表標題 多孔質レシーバのふく射・対流・熱伝導連成シミュレーション
3. 学会等名 2019年度太陽エネルギー学会研究発表会（青森）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原 幸治, 落合 晃大, 中倉 満帆
2. 発表標題 集光照射を受ける多孔質ソーラーレシーバのふく射・対流・熱伝導連成解析
3. 学会等名 2019年度熱工学コンファレンス(名古屋)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hikaru Maruyama, Mitsuho Nakakura, Selvan Bellan, Hyun-Seok Cho, Koji Matsubara
2. 発表標題 Conjugate Radiation-Convection-Conduction Simulation for Solar Volumetric Receiver with Cubic Lattice as Fundamental Skelton
3. 学会等名 Second Asian Conference on Thermal Sciences, 2nd ACTS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小島帆高, 松原幸治, 中倉満帆
2. 発表標題 ポリュメトリックソーラーレシーバの非定常伝熱解析
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅川大輝, 丸山耀, 中倉満帆, 松原幸治
2. 発表標題 炭酸ガス熱化学分解ソーラー燃料製造に向けた伝熱研究
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

熱工学研究室 http://mu-koba.eng.niigata-u.ac.jp/ 高効率太陽熱発電のための高温型集熱技術の開発 http://mu-koba.eng.niigata-u.ac.jp/aboutus.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	Bellan Selvan (Bellan Selvan) (50785293)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	
研究分担者	長瀬 慶紀 (Yoshinori Nagase) (90180489)	宮崎大学・工学部・教授 (17601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------