

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289357

研究課題名(和文) 高効率太陽熱発電のための高温型粒子流動層式ソーラー集熱/蓄熱システムの開発

研究課題名(英文) Development of hot temperature fluidized bed solar receiver / thermal storage system for efficient solar 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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高効率太陽熱発電のための粒子流動層式集熱/蓄熱システムの研究開発を行った。流動層式集熱器/反応器の研究において、集光照射した円筒式流動層の集熱実験によって1000以上の高温粒子と高温空気が得られることが示された。このため本研究では、流動層式集熱器の数値解析技術の構築と組織的循環を伴う流動層の集熱実験を行い、高温型集熱/蓄熱に有用な新型流動層を提案した。この新型流動層は、これまでの二塔式内循環流動層を基本としながら、連続的な粒子の供給と排出を可能としたものである。その流動の様子を可視化実験し、新型流動層の粒子の外的な循環によって集熱/蓄熱システムに応用可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study develops the fluidized bed solar receiver for efficient solar power generation. Since the solar receiver / reactor development project found that the cylindrical fluidized bed irradiated by concentrated light could increase the air and the particle temperature beyond 1000, this study deals development of numerical simulation methodology on fluidized bed and the experiment on irradiated fluidized bed with organized circulation, to propose new type of fluidized bed receiver. This new type fluidized bed receiver is based on the two-tower fluidized bed receiver which causes the organized circulation of particles by the aeration velocity difference between two towers. It was designed so that the particle can continuously enter and exit the receiver part. The experimental visualization revealed that the new fluidized bed can charge and discharge the particles continuously, to prove its applicability to the solar receiver / storage system.

研究分野：エネルギー学

キーワード：太陽エネルギー 集熱システム 流動層

### 1. 研究開始当初の背景

欧州と米国では集光型太陽熱発電 (CSP) が実用化し、日本を含むアジアにも普及が始まっている。現在の CSP の集熱温度は最高で約 560 である。この集熱温度を上げて熱効率を上げることが重要であり、各国の研究機関は新しい高温型の集熱方法の研究に取り組んでいる。

現在、集熱物質として利用されている硝酸塩系溶融塩は 600 以上で熱分解するため、それに代わる集熱物質が必要である。ドイツ DLR は、空気を熱媒とした新しい集熱技術の研究を行なっている。しかしながら、空気の熱伝達率が低いことや、集熱器 (レシーバ) 本体の材料として用いる耐熱合金の利用温度の制約から、十分な高温が得られているとは言いがたい。

したがって、これまでの溶融塩および空気による集熱法に代わる新しい集熱技術を構築する必要である。米国のサンディア国立研究所では、石英砂をカーテン状に落下させて集光を直接照射する新型レシーバを開発した。融点が高い石英砂を熱媒に用いたことで高温の集熱が可能であるが、集熱温度は約 900 であった。

また集光技術については、これまではタワー型集光システムが主流であったが、楕円形状の二次ミラーによって低い位置に集光するビームダウン集光システムが開発された。このような新型の集光システムを利用することで、高温の集熱・蓄熱システムの開発が進むものと期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では、ビームダウン集光装置と組み合わせるための流動層式集熱・蓄熱システムの開発を行なう。ソーラー集熱器 / 反応器開発プロジェクトによって、円筒式流動層に集光照射することで空気と粒子を共に 1000 以上に加熱できることが示された。このため、本研究では次を目的に掲げて検討を行なう。

- (1) 内部の粒子に組織的循環を与えた流動層について、太陽シミュレータを利用して集熱実験を行う。これにより、粒子の循環による集熱特性の変化を実験的に調査する。これまでの乱流熱輸送の研究によると、大規模な循環によって熱拡散が促進される現象が観察された。このため流動層内部の粒子層においても同様な現象が起こる可能性があり、実験的に確認する。
- (2) 流動層のシミュレーション技術を構築する。特に、次に述べる新型流動層の開発において、粒子の流入と流出を取り扱うこと、二色の粒子を取り扱うことが必要なため、これら二つの解析技術を研究する。二塔式流動層に二色の粒子を詰めた場合の解析を実施し、内部の現象を観察する。

- (3) 連続的な粒子の供給と排出が可能な新型流動層を開発する。粒子を熱媒体として利用することを考えると、粒子を連続的に集熱部に供給し、加熱された粒子を集熱部から除去する必要がある。このため通常のように容器内で粒子を流動させるだけでなく、粒子を外部に循環する必要がある。このため、新型流動層の可視化実験と数値解析を行うことで、その有効性を検討するものとした。

### 3. 研究の方法

実験は、新潟大学熱工学研究室に設置された、図 1 のような太陽シミュレータで行なった。この装置は、キセノンショートアークランプ 6kW 1 灯と楕円ミラーを装備し、下方に集光照射する。焦点距離は 300mm であり、架台底面から 930mm の高さに集光する。集光最大出力は 75W/cm<sup>2</sup> である。



図 1 1kWth 太陽シミュレータ

図 2 は、太陽シミュレータに設置して実験するための流動層式レシーバである。本体はステンレス鋼製矩形容器であり、観察用の窓が取り付けられている。上部には光を取り入れるためのコーンが取り付けられている。本体の矩形容器の中には、外径 6mm の空気導入管が 3 本挿入されている。それぞれの空気導入管の表面には直径 1mm の穴が 16 個あけており、空気を噴出させる。



図 2 流動層式レシーバ

この流動層式レシーバのコーンに接合した直径 20mm の円管は空気の流出用であり、直径 10mm の円管は熱電対による温度測定用のものである。矩形容器には、流動層内の上層と、中間層の 3 点(左右と中央)の合計 4 点にも熱電対を配して温度測定を行なった。

数値解析は、実験と同様な流動層を対象として、オイラーグラニュラー法によって行なった。これまでに構築した数値解析ソフトウェアを基本として、二色の粒子を解析する方法と、境界条件の設定方法について検討した。前者では、空気と二種類の固体相を扱うものとしてモデル化し、二種類の固体相は同じ物性値を有するものとした。数値解析を可視化する時、二種類の固体相を別々に表示することで二色の粒子の混合の計算ができるようにした。後者では、新型流動層で粒子と空気の境界条件を別々に与えることが必要になったため、粒子を供給する断面に粒子の生成率を与えることでモデル化した。

粒子の流入と流出が可能な新型流動層は、アクリル樹脂性の可視化流路を利用して開発した。図 3 は、その基本形となった二塔式流動層のアクリル樹脂性流路である。この流路では、内部に粒子を詰めて、分散板からの空気によって流動化させることができる。二つの塔は、板で仕切られており、塔と塔の間で粒子を循環させることを意図した。このような二塔式流動層に、粒子の流出と排出のための部分を追加することで新型流動層を開発する。

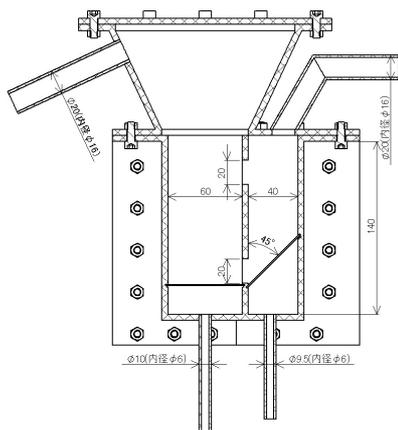


図 3 新型流動層の基本形とした二塔式流動層用のアクリル樹脂性流路

#### 4. 研究成果

研究成果を整理すると次のようである。

##### (1) 内循環流動層の集熱実験

流動層の実験のため、細かな石英砂(直径 0.1mm~0.2mm)と粗い石英砂(直径 1~2mm)を準備した。図 1 は、流動層内部に粗い石英砂を入れて、集光照射した時の温度測定の結果である。三つの空気導入管への空気流量を同じにした場合と、左右対称にして変化させた場合、左右非対称にして変化させた場合に

ついて検討した。図 4 は、左右対称にした場合の温度測定結果である。横軸には全流量をとり、縦軸には流動層内部の熱電対の平均温度をとった。同図では、流量が 90L/min を超えると平均温度が高くなっている。このことから、流動化によって粒子層内部で粒子の縦方向の移動が起こったため、粒子層表面に届いた光は顕熱となり、粒子層内部に拡散しやすくなったと考えられる。最高温度は、三つの流量を等しくした場合が高くなっており、空気導入管によって流量を変化させても大きな違いはない。

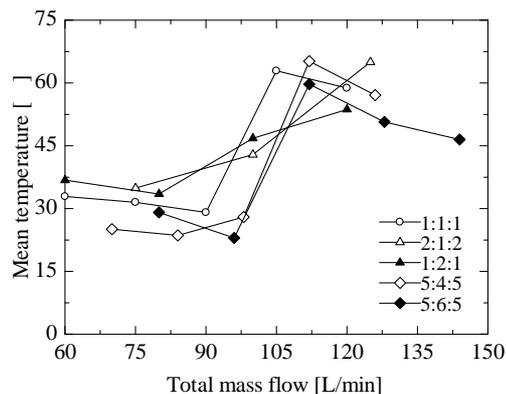


図 4 流動層内部の平均温度の変化(流量を左右対称にした場合)

図 5 は、流量を左右非対称にして変化させた場合の平均温度の時間変化である。この図によると、流量を 4:5:6 にした場合の平均温度がそれ以外のケースよりも高くなっており、しかも、広い流量の範囲で高まっていることが観察される。このことから、流量を非対称にすることで、流動層内部の混合を促進し、温度拡散を速めることができると考えられる。このように流量を非対称化したケースについて、非加熱時において流動層表面の可視化実験を行ったところ、流動層での組織的な循環が起こっていることが観察できた。したがって、流量を非対称化することで、流動層内部の組織的な大規模流動を引き起こし、混合の促進が起こると考えられる。

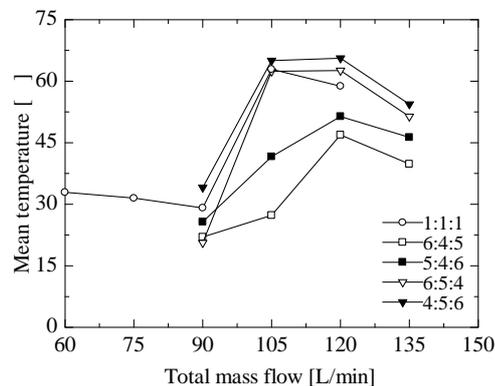


図 5 流動層内部の平均温度の変化(流量を左右非対称にした場合)

### (2) 数値解析技術の構築

数値解析ソフトウェアは、Ansys FLUENT CFDを利用して構築した。図6、7は、2塔式流動層内部に2色の粒子を入れて流動化した場合の数値解析の結果である。最初、左側の塔に粒子1を、右側の塔に粒子2を入れておいて、分散板から空気を流入する。粒子直径は0.3mm、密度は2600kg/m<sup>3</sup>とした。左側の塔に流入する空気速度は0.15m/sであり、右側の塔のそれは0.212m/sである。図6、7は、空気流入開始から1秒後の結果である。

同図において、粒子1は左側の塔を出て右側の塔に入っていく様子を観察できる。したがって、このような二塔式流動層において左側の塔と右側の塔の内部の粒子は大規模に循環し、それによって両者の混合が加速すると考えられる。

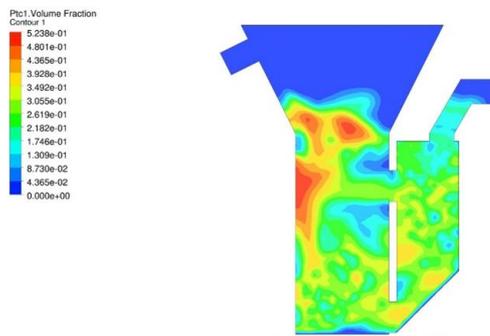


図6 粒子1の体積分率

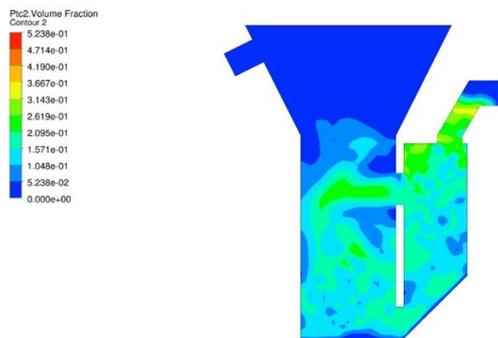


図7 粒子2の体積分率

### (3) 新型流動層の開発

数値解析の結果に基づき、二塔式流動層を進展させて粒子の連続的な流入と流出が可能な新型流動層を開発するものとした。アクリル樹脂性粒子(直径0.7mm~1.4mm)を利用して可視化実験を行うため、実験に先立って、粒子の流動化を検討した。

この実験では底面側に多孔質分散板を設けたΦ25mmの円筒容器に測定対象の粒子を高さ25mmで詰め、下部の分散板から上向きに空気を流入させる。分散板下部と粒子層上部の間の圧力差から粒子を入れない場合の

圧力差を引くことで流動層の圧力損失を測定した。過去の実験から、空気の線速度を増したとき、圧力損失は大きくなるが、流動化が始まると圧力損失が一定になることが分かっている。このことを参考にして、図8のような実験結果から、最小流動化速度は0.17m/sであると判断した。

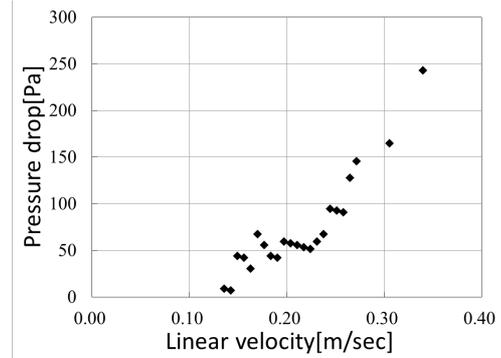


図8 最小流動化速度の検討

このような最小流動化速度の検討結果を参考にして、新型流動層の可視化実験を行った。実験結果からフローマップを図9のように作成した。流れ場は、1.動きがない場合、2.右側の塔のみ気泡が発生した場合、3.左側の塔のみ気泡が発生した場合、4.両方から気泡が発生した場合の四つに分類される。さらに、2.は時計方向に組織的循環が生じた場合とそのような循環が見られなかった場合に分類され、3.は反時計方向に組織的循環が生じた場合とそのような循環が見られなかった場合に分類される。このような可視化によって、流動層に連続的に粒子を供給しながら排出させて、なおかつ、流動層内部に組織的循環を起こすことができることを確認した。

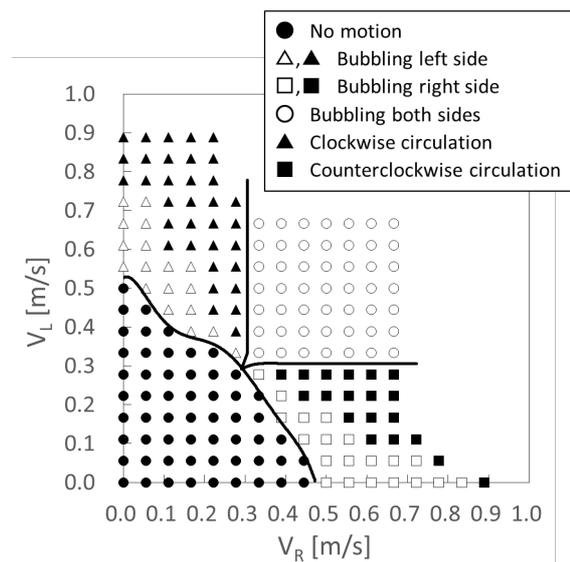


図9 新型流動層のフローマップ

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Koji Matsubara, Yuki Kazuma, Atsushi Sakurai, Tatsuya Kodama, Nobuyuki Gokon and Yoshinori Nagase, Laboratory experiment and simulation of high-temperature fluidized bed air receiver for concentrated solar concentration, Journal of the Japan Institute of Energy, 査読有, Vol. 94, 2015, pp. 1323-1329.

Koji Matsubara, Takahiro Miura and Hiroyuki Ohta, Transport dissimilarity in turbulent channel flow disturbed by rib protrusion with aspect ratio up to 64, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 86, 2015, pp.113-123.

Koji Matsubara, Yuki Kazuma, Atsushi Sakurai, Lee Soon-Jae, Tatsuya Kodama, Nobuyuki Gokon, Cho Hyun Seok and Kazuo Yoshida, High-temperature fluidized receiver for concentrated solar radiation, Energy Procedia, 査読有, Vol. 49, 2014, pp. 447-456.

〔学会発表〕(計 4 件)

Koji Matsubara, Organized structure of single and two phase turbulent flows with scalar transport and some application to solar engineering problems, 1st Pacific Rim Thermal Engineering Conference, March 13-17, 2016 ( Waikoloa Beach Marriot Resort & Spa, Hawaii Big Island )

Koji Matsubara, Takayuki Nozaki and Yusaku Matsudaira, DNS of two-dimensional jet with heat releasing solid spheres, Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, November 22-25, 2015 ( BEXCO Convention Hall, Busan )

Koji Matsubara, Haruhisa Sakai, Yuki Kazuma, Atsushi Sakurai, Tatsuya Kodama, Nobuyuki Gokon, Hyn-Seok Cho, Kazuo Yoshida, Hideki Kawanishi and Tatsuya Yamaue, High-temperature fluidized bed receiver for concentrated solar power generation, Grand Renewable Energy, July 27-August 1, 2014 ( Tokyo Big Sight, Tokyo )

松原幸治・酒井相向・櫻井篤・鈴木翔、イスンジェ・児玉竜也・郷右近展之、微粒子を利用した高温型ソーラー空集熱器の研究、第 50 回日本伝熱シンポジウム、

2013 年 5 月 29 日～31 日(ウェスティンホテル仙台およびトラスティカンファレンス仙台、仙台)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mu-koba.eng.niigata-u.ac.jp/aboutus.html>

## 6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

長瀬 慶紀 (NAGASE, Yoshinori)

宮崎大学・工学教育研究部・准教授

研究者番号：90180489

平元 和彦 (Hiramoto, Kazuhiko)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00261652

(3)連携研究者

児玉 竜也 (Kodama, Tatsuya)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：60272811

櫻井 篤 (Sakurai, Atsushi)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：20529614