

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05354

研究課題名（和文）BD太陽集光装置のための蓄熱粒子流動型太陽光レシーバの開発

研究課題名（英文）Development of a solar receiver with fluidized particles as thermal storage medium for a beam-down solar concentrator

研究代表者

長瀬 慶紀 (Nagase, Yoshinori)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：90180489

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）： 固体蓄熱粒子を流動させながら太陽光で直接加熱して蓄熱を行うとともに、熱機関に用いる作動流体と接触させて熱交換を行うことによって連続的に熱の取り出しを行うことができる新たな蓄熱粒子流動型太陽光レシーバ装置を開発した。太陽光を蓄熱粒子に照射するレシーバは、12角錐台形の形状を採用し、蓄熱粒子を移動させるためにスクリュウフィーダを採用した。また、熱交換器からの作動流体の漏れを減らすために気密弁をレシーバと熱交換器の間に取り付け、蓄熱粒子流動型太陽光レシーバ装置を組み上げた。宮崎大学のビームダウン式太陽集光装置で、この装置を用いて加熱実験を行い動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体蓄熱粒子をビームダウン式太陽集光装置で直接加熱して蓄熱を行うとともに、熱機関に用いる作動流体との熱交換によって連続的に熱の取り出しを行うことができる新たな蓄熱粒子流動型太陽光レシーバ装置を開発した。開発した装置は、蓄熱材料を太陽光により直接加熱させ、機械的に加熱時間を制御できるため、高温加熱が可能で、加熱温度制御が容易である。また、蓄熱粒子から作動流体への伝熱面積が大きいため、短時間に熱の移動が可能であり、熱交換器を小型化できるという特長を持つ。今後、主流になるであろうタワー型太陽集光装置の蓄熱や発電のための研究に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）： A new heat storage particle flow-type solar receiver has been developed that can store heat by directly heating solid heat storage particles with sunlight while they flow, and can also continuously extract heat by exchanging heat through contact with the working fluid used in a heat engine. The receiver, which irradiates sunlight onto the heat storage particles, has a dodecagonal pyramid shape, and a screw feeder is employed to move the heat storage particles. An airtight valve was installed between the receiver and the heat exchanger to reduce leakage of working fluid from the heat exchanger, and a heat storage particle flow-type solar receiver was assembled. Heating experiments were conducted using this device with a beam-down solar concentrator at the University of Miyazaki to confirm its operation.

研究分野：熱工学

キーワード：太陽熱 蓄熱粒子 ビームダウン式太陽集光装置

1. 研究開始当初の背景

太陽光の利用において、太陽電池による電気への変換ばかりでなく、太陽光を熱(太陽熱)に変換して、熱機関による発電や太陽炉による金属の精錬を行うことが注目されている。太陽熱利用のメリットとして蓄熱がある。蓄熱により、夜間でも太陽熱が利用でき、しかも、電気を貯蔵するバッテリーと比べて、低コストでエネルギー貯蔵が可能となる。

太陽熱の蓄熱は、これまで硝酸ナトリウムと硝酸カリウムの混合物の熔融塩が多く用いられてきた。熔融塩は使用温度域において流体であるため、固体に比べて流動させることは容易である。しかし、約 600 を超えると分解してしまい蓄熱材料として使用できないことや、逆に 220 以下では凝固するため、夜間などの太陽光で加熱できない時間帯は、化石燃料を使った加熱・保温が必要となることが問題である。一方、固体顕熱蓄熱ならば熔融塩での前述の問題は生じない。また、熱機関の熱効率の向上には、作動流体を高温にするための蓄熱材料の高温化に取り組む必要がある。そのため、蓄熱粒子を装置内で攪拌させながら太陽光で直接加熱して 1500 以上の高温蓄熱を実現する装置を開発した【参考文献 1, 2】。しかし、この装置は、バッチ式であるため、現在行われている太陽熱発電のように加熱しながら熱機関を稼働させ発電を行うことは困難である。そこで、現行の太陽熱発電へ応用するためには、蓄熱粒子を流動させ連続加熱することが必要となる。

2. 研究の目的

これまでに開発したバッチ式蓄熱装置【参考文献 3】は、一定量の蓄熱粒子を機械的に攪拌しながら太陽光で加熱し、蓄熱するものである。この装置は、蓄熱粒子を直接加熱することができ、機械的に加熱時間を制御するため蓄熱粒子の加熱温度の制御が容易であり、1000 以上の加熱も可能である。熱交換において、蓄熱粒子と作動流体を直接接触させて熱を伝える場合、粒子径が小さいほど単位体積当たりの伝熱面積が大きいので、短時間に熱の移動が可能であり、熱交換器を小型化できる。しかし、バッチ式蓄熱装置は、装置内にある一定量の蓄熱粒子しか加熱することができないため、外部から粒子を取り込み、流動させながら太陽光で加熱し、蓄熱を行うためには、構造を変更した蓄熱粒子流動型レシーバを開発する必要がある。さらに、蓄熱粒子を流動させながら作動流体を直接接触させて熱交換を行う装置をレシーバに接続する必要がある。

よって、本研究の目的は、固体蓄熱粒子を太陽光で直接加熱して蓄熱を行うとともに、熱機関に用いる作動流体との熱交換によって連続的に熱の取り出しを行うことができる新たな蓄熱粒子流動型太陽光レシーバ装置を開発することである。

3. 研究の方法

蓄熱材料を高温化するには固体顕熱が有効であるため、ビームダウン式太陽集光装置(BDSC)での加熱実験データの蓄積がある 5 mm のアルミナ球を蓄熱粒子として採用した。蓄熱粒子を太陽光で直接加熱するレシーバに、蓄熱粒子を熱交換部へと流動させることが可能な流動化装置を取り付け、粒子を加熱しない状態で基本的な装置の特性を把握した。また、熱交換部の基礎的な特性を実験室で調査し、蓄熱粒子と作動流体との間で熱交換を行う熱交換部を開発した。さらに、レシーバと熱交換器を連結するにあたり、熱を受け取る作動流体の漏れを低減するための気密弁を開発した。

これらの要素開発と並行して、熱交換後の蓄熱粒子をレシーバに戻すための粒子持ち上げ装置について、流体を利用した検討を行った。ただし、今回の実験では、レシーバに取り付けるまでには至らなかった。

粒子持ち上げ装置以外の要素を連結させ、蓄熱粒子がレシーバから流量一定で排出され、気密弁を通り熱交換器へ移動するため、流動化装置と気密弁の運転条件を常温の状態を確認した。その後、BDSC での太陽光照射実験を行った。

4. 研究成果

本研究により、設計・製作を行った粒子流動型太陽光レシーバを図 1 に示す。各要素の特性調査および実験を行った結果、以下の研究成果が得られた。

(1) 蓄熱粒子流動化装置の特性調査

設計・製作した流動化装置を図 2 に示す。この装置にはスクリーフィーダを採用した。スクリー部分の検討を行い、台形ねじと市販のスパイラを比較したが、両者に大きな性能の差はみられなかったので、製作が容易となる市販品のスパイラを採用した。スパイ

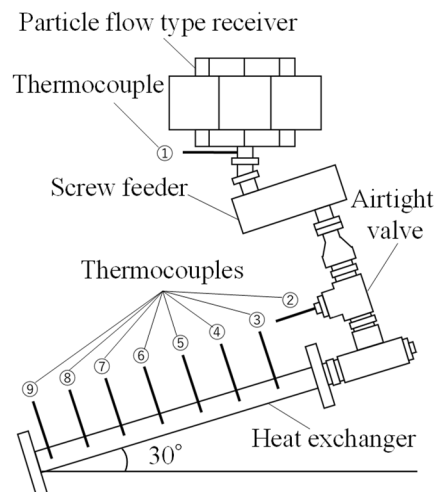


図 1 蓄熱粒子流動型太陽光レシーバ

ラとは、板をらせん状に塑性加工したものである。

図2にスクリーフィーダを1回転させたときの排出量の変動係数を示す。使用した粒子は、3 mm および 5 mm のアルミナ球と 5 mm ステンレス球である。図3よりいずれも変動係数は小さく回転速度による変動も少ないことがわかる。また、蓄熱粒子流量を減らして間欠的に排出することを想定し、回転角度 45, 90, 135 deg. での実験を行った結果、排出される粒子質量は回転角度に比例することを確認した。

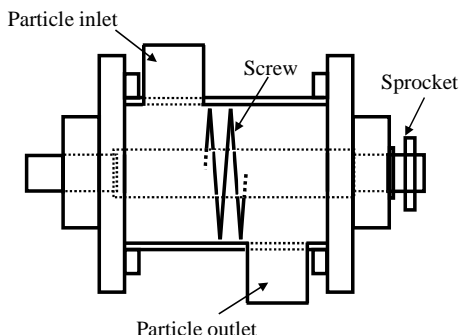


図2 スクリーフィーダ

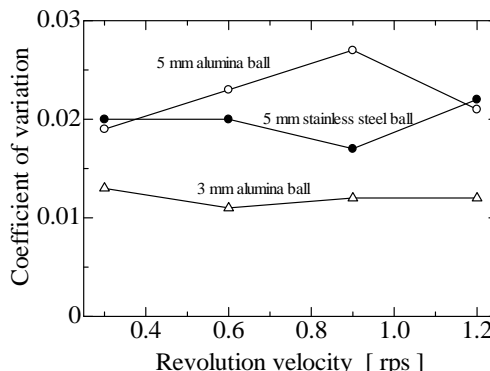


図3 スクリーフィーダの排出特性

(2) 熱交換部の実験室による加熱実験

図4に示す実験装置を用いて、熱交換器内に 800 に加熱した 5 mm のアルミナ粒子を 2 L (4.6 kg) 入れ、0.3 MPaG の圧縮空気を熱交換器に導入し、表1の実験条件で加熱した。熱交換器は、ステンレスパイプの中に蓄熱粒子を入れたもので、蓄熱粒子と圧縮空気が接触して熱交換を行うものである。ただし、図中の粒子の矢印は、実験前の粒子の充填口と実験後の粒子の排出口を示しており、今回の実験では熱交換器内の蓄熱粒子は流動させなかった。

実験結果を図5に示す。図より熱交換器内の粒子で 400 NL/min の圧縮空気を約 10 分間 300 以上まで加熱できることがわかった。すなわち、少なくとも 800 以上の蓄熱粒子を約 10 分程度ですべて入れ替えることができれば、定常的に 300 以上の圧縮空気が得られることがわかった。

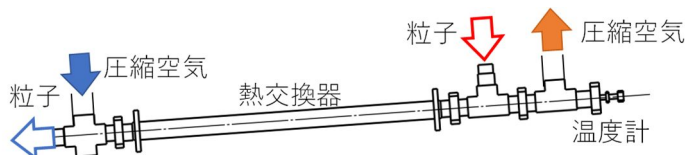


図4 熱交換器による圧縮空気加熱実験

表1 熱交換器の実験条件

作動流体	圧縮空気
圧縮空気流量	400 NL/min
圧縮空気の圧力	0.3 MPaG
蓄熱粒子の材質	アルミナ
蓄熱粒子の粒径	5 ±0.5 mm
蓄熱粒子加熱温度	800
蓄熱粒子量	2 L (4.6 kg)

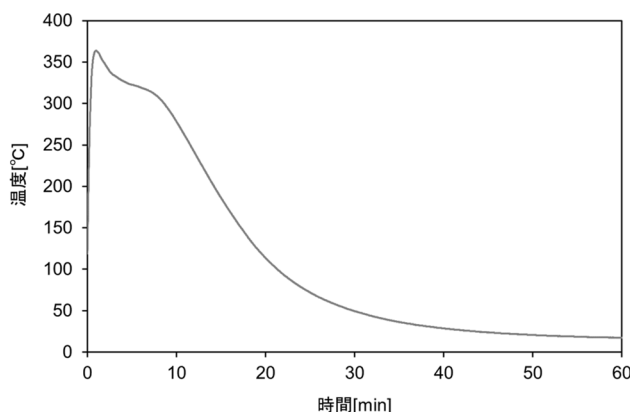


図5 加熱後の圧縮空気温度変化

(3) 熱交換部出入口の気密弁の開発

大気圧で加熱した蓄熱粒子を熱交換器に投入する場合、熱交換器内は高圧の作動流体があるため、熱交換器の出入口には、作動流体の漏れを低減するために気密弁が必要である。図6に開発した気密弁の動作概略図を示す。気密弁は、三方バルブを改良し、1つの出入口を塞ぎ、ポー

ル内に入った蓄熱粒子を、ボールを回転させて熱交換器へと排出するものである。加熱した粒子を移動させることを確認できたが、気密弁のシール部分に粉塵等が付着すると誤動作を起こすことがわかり、今後改良が必要である。

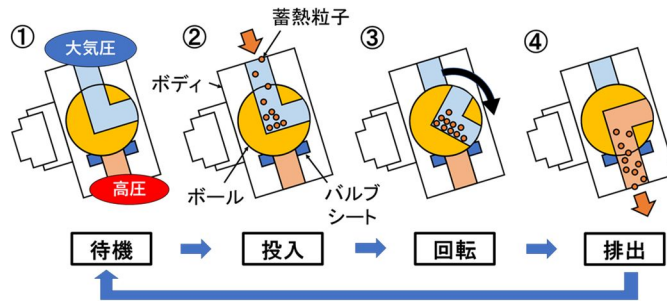


図6 気密弁動作概略図

(4) 粒子持ち上げ装置の検討

熱交換器から排出された蓄熱粒子は、太陽光を照射して再び加熱するためレシーバ部へ持ち上げる必要がある。BDSC に合わせて製作した流動型太陽光レシーバ蓄熱装置の大きさから、粒子を持ち上げる高さは 1500 mm でよいことから、プロアを使って持ち上げる方式とした。水平方向の長さを長くし粒子を加速させる必要があるが、スペースの関係から 2420 mm とした。また、粒子の移動方向を上方向に変えるため、斜めに管を取り付けた。管の内径は 25.6 mm で、管内の空気流速は、36.3 m/s、1 回に投入する直径 5 mm、密度 3584 kg/m³ のアルミナ球の総質量は気密弁の 1 回分の排出量を考慮して 31 g とした。実験は、気密弁の代わりに 2 個のボールバルブを用い、上のバルブを開いて粒子を投入した後、バルブを閉じ、その後下のバルブを開けて管路に粒子を送り出すものである。その結果、投入後 3 秒程度で持ち上げることができた。

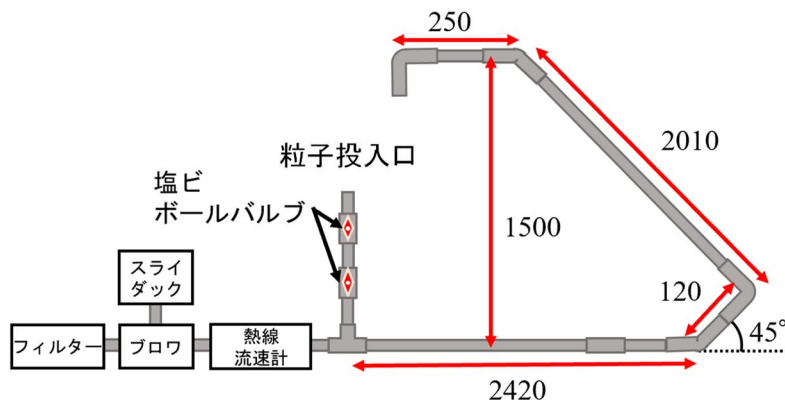


図7 粒子持ち上げ装置概略図

(5) BDSC での実験

以上の要素を図 1 のように接続し、BDSC にて蓄熱粒子加熱実験を実施した。実験条件を表 2 に示す。実験中の天候は快晴で、図 8 に示すように、ほぼ一定の直達日射量 (DNI) であった。

5 mm アルミナ球を平均質量流量 0.3 g/s で加熱した結果、レシーバ出口では図 8 に示す温度経過を示し、約 380 まで加熱することができた。53 分、63 分、82 分で大きく温度が低下したのは、気密弁の不調によりヘリオスタットの集光を停止したためである。BDSC の加熱実験では、気密弁の不調により、レシーバ出口での蓄熱粒子温度が定常状態になる前に実験を終了した。なお、1.2 g/s で実験を行った場合、日照条件はほぼ同様で蓄熱温度を 480 まで上げることができたため、さらに粒子温度を上昇させるため流量を減らした実験を行ったが、粒子の流量を減らして加熱温度を上げても熱損失が大きいため、かえって粒子温度が低下した。このことから、レシーバ出口の断熱性をさらに高める必要があることがわかった。

熱交換器内の温度変化を図 10 に示す。図 1 に示すように、熱電対は最初の加熱されていない蓄熱粒子が溜まる位置にあるため、温度変化が見られない。30 分に熱電対、70 分に熱電対

が温度上昇し始め、それぞれその 2-3 分後に最高温度に達する。また、熱交換器に流れるまでの経路および熱交換器内での熱損失が大きいことから、最高温度も 40 - 50 程度となっており、システム全体として断熱性を高める必要がある。なお、その他の熱電対は、粒子流量が少ないため、熱電対のある熱交換器の位置まで粒子が溜まらなかったため温度変化はなかった。

表 2 BDSC での実験条件

蓄熱粒子	5 mm アルミナ球
平均質量流量	0.3 g/s
ヘリオスタット平均稼働数	45 基
実験開始日時	2022 年 1 月 12 日 11:00AM
平均直達日射量	955 W/m ²

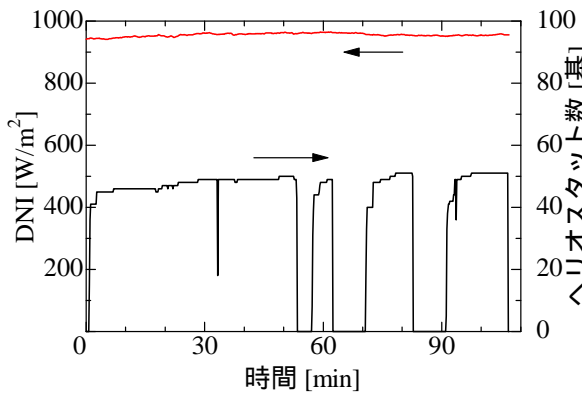


図 8 DNI およびヘリオスタット稼働数

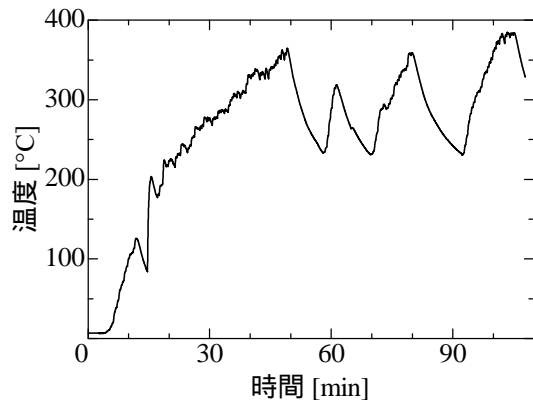


図 9 レシーバ出口での蓄熱粒子温度変化

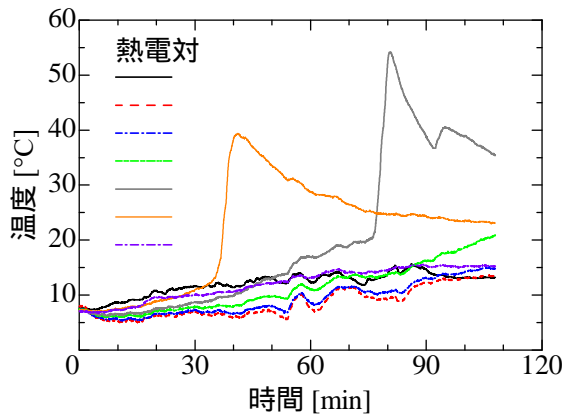


図 10 熱交換器内温度変化

以上より，固体蓄熱粒子を連続的に加熱できる蓄熱粒子流動型太陽光レシーバ蓄熱装置を開発し，実験により基本動作を確認した．今後，性能向上のため，気密弁の改良やシステム全体の断熱性の向上のための改良が必要である．

【参考文献】

- 1．長瀬慶紀，森暢彦，友松重樹，河村隆介，金子宏，松原幸治，ビームダウン式太陽集光装置のための機械攪拌式顕熱蓄熱装置の開発，日本機械学会論文集，83(847)，16-00370，pp.1-12，2017
- 2．S. Tomomatsu, Y. Nagase, R. Kawamura and N. Hayashi, Study on applicability of reciprocating engine for solar heat power generation, ICSTE2016, pp.169-172, 2016.
- 3．特許第 6798692 号，蓄熱装置，特許権者：国立大学法人 宮崎大学，発明者：長瀬慶紀

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 橋本 直季, 長瀬 慶紀, 友松 重樹, 野村 文椰, 木村 正寿	4. 巻 49
2. 論文標題 太陽光レシーバから熱交換器への蓄熱粒子移動方法の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 宮崎大学工学部紀要	6. 最初と最後の頁 39 - 44
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 無
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 -

1. 著者名 赤坂重堯, 長瀬慶紀, 友松重樹, 前田順登	4. 巻 48
2. 論文標題 太陽集光装置による軽焼ドロマイトの加熱特性調査	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 宮崎大学工学部紀要	6. 最初と最後の頁 17 - 22
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 無
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 野村文椰, 長瀬慶紀, 前田順登, 友松重樹, 木村正寿, 安在晋太郎	4. 巻 48
2. 論文標題 蓄熱粒子からの熱の取り出し方法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 宮崎大学工学部紀要	6. 最初と最後の頁 23 - 28
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 無
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryuusuke KAWAMURA1, Kozo ONOUE, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU, and Rinsei ISHIGAMI
2. 発表標題 Effect of Surface Areas of Heated Air Flow Paths on Heat Storage Efficiency of Mortar Block
3. 学会等名 The 7th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R.Nagatomo, S. Tomomatsu, Y. Nagase
2. 発表標題 Development of Optical Axis Adjustment Device for Heliostat of Beam-Down Solar Concentrator
3. 学会等名 International Conference on Applied Electrical and Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤大輝, 長瀬慶紀, 友松重樹, 河村隆介
2. 発表標題 放射温度計を利用した高温域の蓄熱粒子の吸収率計測
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第73期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濟陽 悠馬, 長瀬 慶紀, 友松 重樹, 赤坂 重亮, 河村 隆介
2. 発表標題 太陽熱を用いた酸化マグネシウムの還元 (レトルト炉の回転による温度均一化の検討)
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第73期総会・講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Ryuusuke Kawamura, Kozo Onoue, Yoshinori Nagase, Shigeki Tomomatsu	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 12
3. 書名 Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	友松 重樹 (Tomomatsu Shigeki) (30315353)	宮崎大学・工学部・助教 (17601)	
研究分担者	河村 隆介 (Kawamura Ryuusuke) (70234135)	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