

令和元年6月18日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06973

研究課題名(和文) BD太陽集光装置の固体攪拌・直接加熱式蓄熱槽の開発

研究課題名(英文) Development of a thermal storage tank with directly heated moving particles for 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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)： ビームダウン式太陽集光装置(BDSC)は、太陽光を下向きに集光するタイプのタワー型太陽集光装置である。

本研究では、BDSCのための、固体蓄熱粒子を移動させながら、直接太陽光で直接加熱する形式の太陽光レーザーの機能を備えた蓄熱装置の設計・製作を行った。アルミナを蓄熱粒子としてBDSCで行った実験で、最高温度1570を達成した。また、蓄熱粒子の粒径や材質の違う粒子を用いた実験も行った結果、粒子の熱物性よりも吸収率が蓄熱効率に大きな影響を及ぼすことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ビームダウン式太陽集光装置(BDSC)は、下方向に太陽光を高倍率で集光することのできる装置である。この特徴を生かした蓄熱装置を開発し、実際にBDSCにより加熱実験を行った結果、1000以上の高温での顕熱蓄熱を可能にした。このことにより、高温作動流体を必要とするガスタービン駆動への応用が視野に入った。また、蓄熱の高温化は、熱機関を高効率に駆動することや、蓄熱装置のコンパクト化に貢献できることにも意義がある。

研究成果の概要(英文)： A beam-down solar concentrator (BDSC) that concentrate the sunlight, downward from the tower top, is one of the solar towers.

In this study, a solar receiver with a thermal storage tank for BDSC was designed and constructed. Storage materials in the solar receiver are solid particles that are mechanically moved and are directly heated by the concentrated sunlight. An experiment using BDSC, adopted alumina balls as storage materials, reached 1570 of maximum temperature. It is found that the diameters and the kinds of material of the storage particles do not affect the efficiency of thermal storage. Nevertheless, the absorption of the storage material affects efficiency.

研究分野：熱工学

キーワード：太陽熱 蓄熱 太陽集光装置 再生可能エネルギー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーの中で太陽光利用への社会的関心は高く、世界的にみると太陽電池ばかりでなく太陽熱により発電や燃料製造を行うプラントの建設が進められている【NEDO 再生可能エネルギー技術白書】.太陽熱利用のメリットの一つは蓄熱であり、蓄電と比較して安価にエネルギーを貯蔵できる.宮崎大学には日本最大級のビームダウン式タワー型太陽集光装置(以下、「BDSC」)が設置され、太陽光を集光して熱(太陽熱)にかえ、金属精錬や水素製造などの実証実験が進められている.BDSCの集光原理は、ヘリオスタットと呼ばれる太陽追尾装置の凹面鏡で反射された光をタワー上部の楕円鏡で再び反射し、第2焦点に向かって下向きに太陽光を集める方式である.

これまでの太陽熱の蓄熱装置は、溶融塩を使用したものが主流であり、600 以下の使用に限定されるため、トラフ型太陽集光装置で主に使用されている.一方、タワー型での蓄熱の方法としては、溶融塩【Hasuike, Tamaura, Solar Energy,2006】や砂を利用したものがある.砂を利用した蓄熱装置は、砂をカーテン状に落下させ、そこに太陽光を照射する方法であるが、熱損失および砂の流量コントロールが問題となる.いずれの方法も、タワー型のメリットである高温蓄熱を実現できていない.

2. 研究の目的

太陽熱を利用するメリットに、エネルギーを安価に蓄えることがあげられる.しかし、BDSCは、集光方向の違いにより他のタワー型太陽集光装置に用いられている蓄熱装置を利用することは困難である.よって、これまでより高温の1000 での顕熱蓄熱を実現するため、蓄熱材を直接加熱する方式のBDSC用蓄熱装置を開発することを目的とする.

3. 研究の方法

まず、蓄熱槽の設計・製作を行った.蓄熱槽の設計および設置にあたっては、受光する太陽光の放射流束分布を求める必要がある.そのため、開発した熱流束計(当科研費を申請する前に特許取得済み)を利用して、太陽集光部焦点付近の放射流束分布を求めた.

次に、製作した蓄熱槽を使用して、BDSCでの加熱実験を行った.蓄熱材料として熱物性値が明らかな球体(蓄熱粒子)を三種類用意し、粒径および攪拌速度(ピストン速度)を変化させて、BDSCで加熱実験し、蓄熱槽内の温度分布ならびに蓄熱量を求め、蓄熱粒子の熱伝導率、吸収率などの熱物性値と攪拌速度との関係および蓄熱効率を求めた.

また、蓄熱材料の選定にあたっては、1000 まで使用でき、同じ体積で熱容量がほぼ等しく、熱伝導率が異なる三種類とする.本研究では、安価で入手できるアルミナ球をもとに、熱伝導率および熱拡散率が約2倍のステンレス球、約3倍の炭素鋼球とした.

4. 研究成果

(1) BDSC 焦点部付近の放射流束計測

BDSCは図1に示すように、ヘリオスタットが太陽に追従しながら太陽光を中央タワーに向けて反射し、タワー上部に取り付けた楕円鏡で下方向に太陽光を集光させる装置である.その集光した光をさらに濃縮するためCPCが設置させている.本研究で開発した蓄熱装置は、CPCの下に設置されている.

蓄熱装置を設計するため、CPC出口の放射流束分布を計測した.

一例としてCPC下150mmの位置での放射流束分布を図2に示す.計測日の直達日射量(DNI)は733 W/m²で、ヘリオスタットは74基が集光に参与した.このような計測をCPC下150mmから250mmまで25mm毎に行うことで、CPC下の3次元放射流束分布を求めることができた.

さらに、これらのデータをもとにDNIの強さや集光に有効なヘリオスタットの数が影響しないように、放射流束をDNIとヘリオスタットで除した無次元数を求め、蓄熱装置の設計や運転のためのデータとした.

(2) 蓄熱装置の設計・製作

図3に本研究で設計・製作した機械攪拌式顕熱蓄熱装置の概略図を示す.BDSCの集光方向を考慮し、また、高温蓄熱を実現するため、図3のように固体蓄熱材上面を集光された太陽

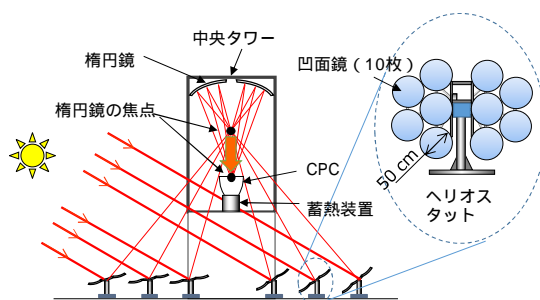


図1. BDSCの集光原理

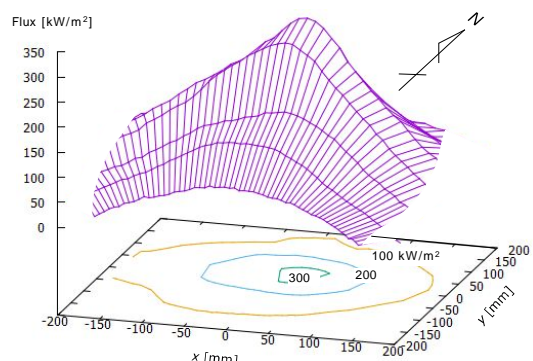


図2. CPC下150mmでの放射流束分布

光で直接加熱する形式でありレシーバの機能を備えた蓄熱装置とした。

蓄熱槽は、内外のシリンダ、面積が互いに等しい内側円形ピストンと外側ドーナツ形ピストン、外気との対流熱伝達を防止するための透過率 $\tau = 0.9$ の石英ガラスで囲まれた空間でその中に蓄熱材がある。両ピストンは同じ速さで互いに逆方向になるように上下方向 (z 軸方向) に移動することで、蓄熱材は攪拌され、蓄熱材を構成する蓄熱粒子は表面で順に加熱される仕組みである。

この蓄熱装置には次のような特長を持つ。

- ・固体蓄熱材に顕熱で蓄熱を行うため、熔融塩による潜熱蓄熱よりも高温での蓄熱が可能である。
- ・蓄熱材を直接太陽光で加熱するため、間接加熱方式より蓄熱材を加熱する際の熱損失が少ない。

(3) 蓄熱装置の BDSC での実験条件の検討

蓄熱粒子は、融点が 2072 (理科年表, 2015) と高く、種々の粒径のもの入手しやすいアルミナ球を用いた。また、粒径については、粒子中心部まで速く加熱されるためできるだけ小さいものが良いが、ピストンとシリンダのすきまを考慮して 5mm とした。

ピストンの動く方向により、加熱面の形状が変化するが、次のような理由から、図 3 に示すように内ピストンが下降する方向で実験を行うこととした。

- ・集光された太陽光は CPC 中心から外側に広がるため、蓄熱材の外周部における z 方向の位置が高くなることで、蓄熱材に照射されず蓄熱槽側壁にもれる太陽光が減少し、入射損失が低減する。

- ・蓄熱材表面の形状が下に凸の形となり、(1) の放射流束計測の結果より、入射強度が均一に近づき蓄熱材内部の温度分布がより小さくなる。

- ・加熱終了後に蓄熱粒子が内部円筒に集まり、外部円筒が空気の断熱層となるため保温効果が高まる。

蓄熱槽には、蓄熱材加熱面の形状を考慮して 16 本の熱電対を取り付け、温度計測を行った。温度計には K 型シース管熱電対を使用し、その取り付け位置 \sim を図 4 に示す。なお、熱電対 \sim は、シリンダに固定され定点計測を行うためのもので石英ガラス下面から 145 mm 下方に取り付けられており、 \sim は中心、 \sim から \sim は半径方向にそれぞれ 50, 100, 150mm にある。熱電対 \sim は、ピストンとともに移動するもので、高さ位置はピストン上面から 20mm 上方に取り付けられている。

BDSC での蓄熱槽の加熱実験において、粒子群の表面は、ピストンが静止している実験開始は、表面が平らな状態で $z = -210$ mm の高さ位置にある。その後、すり鉢状に粒子群の表面が変化する。その様子を測定した結果を図 5 に示す。図 5 より 2 分経過するとすり鉢状の定常な状態となることからわかる。

BDSC での加熱実験は、ピストン移動距離 150 mm、実験時間 50 min、サンプリング間隔 1 s、蓄熱材総質量 50 kg の条件で行った。

熱電対 \sim の温度変化を図 6 に示す。なお、熱電対 \sim は、熱電対 \sim と同程度に温度変化が小さいため省略する。

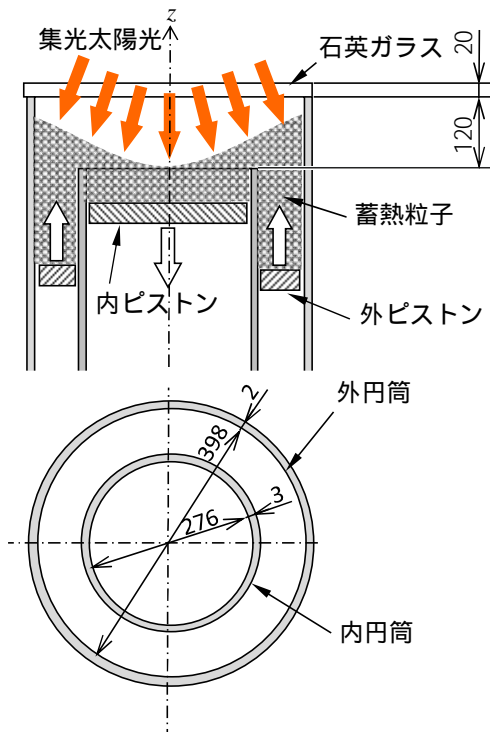


図 3. 蓄熱装置

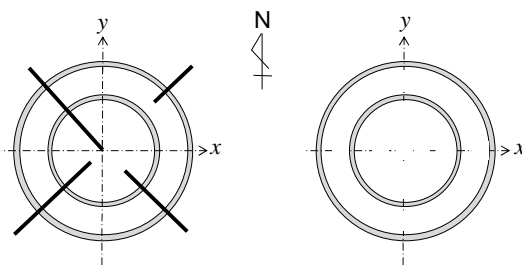


図 4. 熱電対取り付け位置

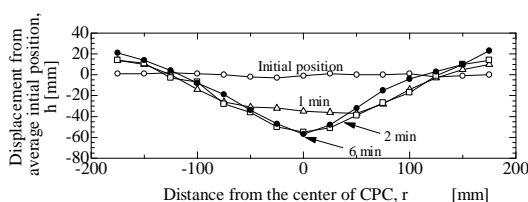


図 5. 蓄熱粒子群表面状態の変化

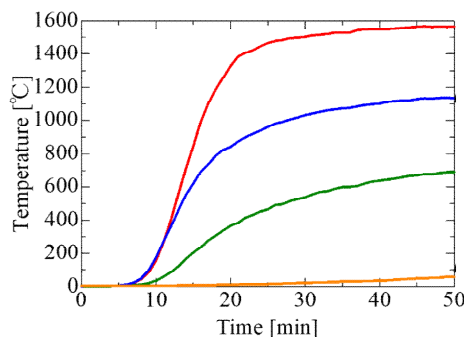


図 6. アルミナ球 5 mm の実験結果

図6より、ピストン速度は、150 mmを50 minで移動する3 mm/sでは、最高温度が1570 で定常状態に達していることが分かった。また、アルミナ球の場合ピストン速度3 mm/sよりも遅くするとアルミナ球の耐熱温度を超える可能性があることがわかった。

(4)蓄熱粒子の粒径の影響

蓄熱材料であるアルミナ球の粒径を、3 mm、5 mm、10 mm と変更することにより、蓄熱材料の粒径が、蓄熱効率にどのように影響があるかの調査を行った。実験結果を表1に示す。

表1. 蓄熱粒子の粒径を変えた実験結果

粒径 [mm]	3	5	10
DNI [W/m ²]	433	928	772
ヘリオスタット	73	77	80
最高温度 []	1000	1570	1352
入射量 [MJ]	43.1	95.3	82.1
蓄熱量 [MJ]	6.0	12.9	11.1
蓄熱効率 [%]	13.8	13.5	13.6

また、定常状態に達したとみなせる実験終了時をもとにまとめた結果を表2に示す。

表2. 定常状態での蓄熱状態

粒径 [mm]	3	5	10
入射量 [kW]	14.0	32.0	27.0
蓄熱量 [kW]	2.4	5.0	4.5
蓄熱効率 [%]	17.0	15.3	16.0

表1から、最高温度は5 mmのアルミナ球を使用した加熱実験で最も高く1570 である。最高温度の結果を比較すると、5 mm、10 mm、3 mmの順に高いことが分かる。これは、入射量が最高温度に影響するため妥当な結果であると考えられる。蓄熱効率を比較すると、3 mmのアルミナ球の加熱実験が定常状態で17.0 %と最も高く、差はわずかであるが、3 mm、10 mm、5 mmの順に高いことが分かる。また、最高温度が高いほど蓄熱効率が低い傾向がみられる。これは、温度が高くなるほどアルミナの吸収率が低下し、蓄熱効率が低下したためと考えられる。

以上のことから、今回使用した3 ~ 10 mmの範囲では、蓄熱材料の粒径による蓄熱レシーバ装置の蓄熱効率の変化は見られなかった。これは、この粒径の範囲では、ピオ数が0.1よりも小さく、粒子表面と中心部の温度差が小さいためと考えられる。したがって、今後ほかの材料を使用して実験を行う際は、種々の材料で入手しやすく、装置駆動時の問題のない5 mmの粒径のものを使用することとした。

(5) 蓄熱粒子の物性値の影響

蓄熱レシーバ装置に使用する蓄熱材料を、アルミナ、ステンレス、炭素鋼に変えて実験を行った。これらの材料は、いずれも1000 まで使用でき、同じ体積で熱容量がほぼ等しく、アルミナ球をもとに熱伝導率および熱拡散率がステンレス球で約2倍、炭素鋼球で約3倍である。一方、光の吸収率は、温度により変化し高温域での値が不明であるが、ステンレス球、アルミナ球、炭素鋼球の順になる。しかし、ステンレス球は一度加熱実験を行うと表面が酸化するため、アルミナ球よりも吸収率は高くなるものと考えられる。

なお、ピストン速度3 mm/sでは炭素鋼球の使用温度を超える可能性があるため、ピストンの移動距離は150 mmのまま、移動時間を5.5 minとし、ピストン速度を27.3 mm/minに変更して実験を行った。

実験の結果、実験終了時の定常状態において、アルミナ球では最高温度が810 になり表1よりも低下したため、吸収率が上昇し蓄熱効率は56.9 %になった。また、最高温度は、DNIに依存するため、蓄熱効率のみを比較すると、ステンレス球は50.0%、炭素鋼球は71.6%となり、吸収率が高い順に蓄熱効率が高くなった。さらに、一度実験を行い表面が酸化したステンレス球を使った実験では、蓄熱効率68.1%で、蓄熱効率が炭素鋼球に近づいた。一方、熱伝導率や熱拡散率については、蓄熱材料が球体であるため、粒子どうしが点で接触しているため、蓄熱効率に大きな影響を与えなかったものと考えられる。

また、蓄熱粒子の材質を選定する際、ステンレスは、1300 まで表面が溶け出すこともないため、高温環境下でも使いやすいというメリットもあるため、表面を酸化させたステンレス球が蓄熱材料として適しているものと考えられる。

(6) まとめ

本研究において次の成果が得られた。

蓄熱材料を直接加熱し、蓄熱を行う装置を設計・製作した。

蓄熱材料を球体とした場合、その直径は10 mm以下では蓄熱効率に影響しないことがわかった。

た。

蓄熱材料の吸収率が蓄熱効率に影響していることがわかった。一方、蓄熱材料が球体の場合、熱伝導による熱移動が少ないことから蓄熱材料の熱物性値は蓄熱効率への影響は少ないことがわかった。

直径 5 mm のアルミナ球を使って BDSC にて加熱実験を行った結果、1000 以上の顕熱蓄熱を実現することができた。

以上の成果より、ガスタービンを駆動するための熱源への応用が視野に入った。また、蒸気タービンなど従来の熱機関への利用にあたっては、高温化が可能となり、カルノーの法則から蓄熱効率の向上が期待できるとともに、蓄熱装置のコンパクトにも貢献できることに意義がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- (1) Ryuusuke Kawamura, Kozo Onoue, Yoshinori Nagase and Shigeki Tomomatsu, Experimental and analytical examination in solid sensible cylindrical heat storage block consisted of ferronickel slag, In: Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines: Valerii P. Matveencko, Michael Krommer, Alexander K. Belyaev, Hans Irschik, 69-79, Springer, Switzerland, (2019) 査読有
- (2) N. Maeda, Y. Nagase, S. Tomomatsu, Y. Fukui, S. Akasaka, F. Nomura, R. Kawamura, Improving Uniformity of Temperature Distribution in Heating Medium of a Solar-Particle Receiver, International Conference on Science, Technology & Education (ICSTE2018), (2018) 査読有
- (3) Y. Fukui, S. Tomomatsu, Y. Nagase, N. Maeda, N. Hayashi, Study on Effect of Valve Timing to Performance of Compressed Air Engine, (ICSTE2018), (2018) 査読有
- (4) 前田順登, 長瀬慶紀, 友松重樹, 安在晋太郎, 木村正寿, 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, 宮崎大学工学部紀要第 47 号, pp.49-54, (2018) 査読無
- (5) 安在晋太郎, 友松重樹, 長瀬慶紀, 林則行, 前田順登, 楠原厚志, 太陽熱発電用レシプロエンジンの改良 (水蒸気駆動時のコントローラビリティの改善), 宮崎大学工学部紀要第 47 号, pp.67-72, 2018 年 7 月, 査読無
- (6) R. Kawamura, Y. Nakanishi, K. Onoue, Y. Nagase, S. Tomomatsu, K. Yasui, K. Hayase, Z.Y. Zhou, Storage performance analysis of solid sensible cylindrical heat storage block consisted of ferronickel slag, 3rd International Workshop on Advanced Dynamics and Model Based Control of Structures and Machines, (2017) 査読有
- (7) N. Maeda, Y. Nagase, S. Tomomatsu, S. Anzai, R. Kawamura, Improvement of a Particle Receiver for a Beam-down Solar Concentrator, 4th International Conference on Applied and Mechanical Engineering 2017 (ICAEME 2017), 2017.8.31-2017.9.2, 査読有
- (8) S. Anzai, S. Tomomatsu, Y. Nagase, N. Maeda, N. Hayashi, Improvement of Compressed Air Engine for Solar Thermal Generation, ICAEME 2017, 2017.8.31-2017.9.2, 査読有
- (9) 中川皓貴, 長瀬慶紀, 友松重樹, 木村正寿, 火花点火機関燃焼室における熱伝達率算出式の検討 (燃焼室内主流が無視できる場合), 宮崎大学工学部紀要第 46 号, pp.47-52, 2017.7, 査読無
- (10) 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, 長瀬慶紀, 森暢彦, 友松重樹, 河村隆介, 金子宏, 松原幸治, 日本機械学会論文集 Vol. 83, No. 847, p. 16-00370, (2017), 査読有
- (11) Y. Nagase, S. Tomomatsu, T. Kikunaga, R. Kawamura, Measurement of Heat Flux on Light Condensing Spot of a Solar Simulator, International Journal of Innovations in Engineering and Technology, Available Online at www.ijiet.com, (2016) Special Issue -ICAEME & 2nd-ACEIAT 2015, pp.8-16, 査読有

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) Z. Y. ZHOU, S. IWAKIRI, K. ONOUE, Y. NAGASE, S. TOMOMATSU, R. KAWAMURA, Experimental Examination in Mortar Hollow Circular Cylinder Block for Heat Storage
10月26-29日, 台湾台南市で開催される
The 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures
(ACMFMS 2018)
- (2) 高橋 隼也, 前田 順登, 長瀬 慶紀, 友松 重樹, 太陽熱蓄熱材料の吸収率の簡易計測方法の開発, 第 10 回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, USB, pp.1-4, 2018.3.8, 都城
- (3) 赤坂 重堯, 前田 順登, 長瀬 慶紀, 友松 重樹, 軽焼ドロマイト加熱特性の調査, 第 10 回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, USB, pp.1-4, 2018.3.8, 都城
- (4) 畑 奉佑, 前田 順登, 長瀬 慶紀, 友松 重樹, 機械攪拌型蓄熱装置の蓄熱温度均一化の検討, 第 10 回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, USB, pp.1-4, 2018.3.8, 都城

城

(5) 福井 雄大, 安在 晋太郎, 奥西 一樹, 友松 重樹, 長瀬 慶紀, 河村 隆介, ビームダウン太陽熱集熱装置による太陽熱エンジン駆動に関する研究, 第10回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, USB, pp.1-4, 2018.3.8, 都城

(6) 野村 文椰, 前田 順登, 長瀬 慶紀, 友松 重樹, 太陽熱蓄熱装置からの熱の取り出し方法の検討, 第10回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, USB, pp.1-4, 2018.3.8, 都城

(7) 周 志雲, 早瀬憲佑, 岩切翔平, 中西由希子, 尾上幸造, 長瀬慶紀, 友松重樹, 河村隆介, モルタル円筒蓄熱ブロックの量実験及び理論的考察, 日本機械学会 M&M2017 材料力学コンファレンス, 講演 No.0S1722, No.17-5, 2017.10.7-9, 札幌

(8) 長瀬慶紀, 友松重樹, 河村隆介, 宮崎大学における太陽熱利用の取り組み - 集光部放射流束計測装置, 太陽熱変換装置, エンジン, 蓄熱について -, 第24回技術・研究発表交流会, 2017.9.22, 宮崎市民プラザ

(9) 安在晋太郎, 楠原厚志, 友松重樹, 長瀬慶紀, 木村正寿, 太陽熱発電用レシプロエンジンの改良(水蒸気駆動時のコントロールパリティの改善), 第9回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, pp.5-8, 2017

(10) 前田順登, 森暢彦, 西山拓治, 長瀬慶紀, 友松重樹, 河村隆介, 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, 第9回日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, pp.105-106, 2017

(11) 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型顕熱蓄熱装置の開発, 日本機械学会第21回動力・エネルギー技術シンポジウム, 平成28年6月16日~17日, 横浜市

〔図書〕(計 1 件)

(1) R. Kawamura, Y. Nagase, S. Tomomatsu, (2017), Effect of material layers in a compound circular receiver model design for concentrating solar power. In: H. Irschik, et al. (eds.), Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines, Springer International Publishing Switzerland, pp.125-136, DOI 10.1007/978-3-319-43080-5_14.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 蓄熱装置

発明者: 長瀬 慶紀

権利者: 国立大学法人宮崎大学

種類: 特許

番号: P03QC16AA

出願年月日: 2016年12月02日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 友松 重樹

ローマ字氏名: (TOMOMATSU, Shigeki)

研究協力者氏名: 河村 隆介

ローマ字氏名: (KAWAMURA, Ryuusuke)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。