

蓄熱粒子からの熱の取り出し方法の検討

野村 文椰¹⁾・長瀬 慶紀²⁾・前田 順登¹⁾・友松 重樹³⁾・木村 正寿⁴⁾・安在 晋太郎¹⁾

Study on Heat Transfer Method from Thermal Storage Particles

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

Abstract

In recent years, renewable energy has been focused because of global warming and depletion of fossil fuels. Especially solar thermal power generation has advantages, since the energy source is the sun that is possible to secure a semi-permanently clean energy source. Furthermore, electricity can be generated even night by stored heat. In this laboratory, study of solar thermal power generation using a beam-down solar concentrator has been conducted. Studies of solar thermal storage devices that stored heat in alumina particles as thermal storage materials have been conducted and their characteristics have gradually been known. Therefore, it is necessary to consider a method for extracting the stored thermal energy. In this study, we designed and fabricated a compact model of a steam generator that generates steam by contacting water and thermal storage materials that has stored heat, and investigated its characteristics. As a result, the increase generated steam per unit time in proportion to the increase in the cross-sectional area of the steam generator.

Keywords: Solar thermal, Steam, Renewable energy, Solar concentrator

1. はじめに

現代社会において、人間は多くのエネルギーを消費しながら生活を送っており、産業技術の進歩に伴いさらに多くのエネルギーが必要とされてきている。現在のエネルギー供給の多くは火力発電や原子力発電などに頼っているが、化石燃料などの資源が有限であることやエネルギー生産時に有害物質を発生させ、地球温暖化や環境汚染などを進める原因となっていることなどが問題になっている。そこで、エネルギー源が太陽であるため、半永久的にクリーンなエネルギー源を確保することができ、蓄熱を行うことで、太陽が出ていない夜間にも発電を行うことができる太陽熱発電に注目が集まっている。太陽熱発電とは、太陽熱によって生成した蒸気を用いてタービンを回し、発電するシステムである¹⁾。

本研究室では、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太陽集光装置のための固体攪拌型蓄熱装置の研究²⁾が行われており、より高温でより高効率な蓄熱が可能となってきている。現在もさらなる効率向上のためにレシーバの研究が行われているが、固体粒子への蓄熱後のエネルギーを取り出す方法はまだ確立されていない。ビームダウン式太陽集光装置と固体粒子を用いた発電方法の確立のためにも、蓄熱材料へ蓄熱され

たエネルギーを取り出す方法の確立が必要となっている。そこで、本研究の目的は宮崎大学に設置されているビームダウン式太陽集光装置において、本研究室で開発された固体攪拌型粒子蓄熱装置によって蓄熱された蓄熱材料から熱を取り出す装置の開発である。ビームダウン式太陽集光装置と固体粒子を用いた発電プラントの研究はあまり行われておらず、その発電方法を確立するために、本研究では、ビームダウン式太陽集光装置によって蓄熱が行われた固体粒子と水を直接接触させ、熱交換することによって蒸気として蓄熱された熱エネルギーを取り出し、熱機関を駆動させ、発電を行うことを最終目標として、装置の設計・製作を行う。しかし、装置の設計をするにあたり、装置の形状など不確定な要素が多く、装置の設計が困難であった。

したがって、熱を取り出す装置の小型モデルを設計・製作し、製作された装置で実際に実験を行い、その動作を確認することとした。また、ビームダウン式太陽集光装置を用いた固体粒子加熱実験では、晴天時以外の固体粒子加熱は難しく、実験回数が限られてしまう可能性がある。このような事態を防ぐために、簡単に粒子を加熱することができる装置を製作することとした。よって、本研究の目的は、ビームダウン式太陽集光装置によって固体粒子に蓄熱された熱を取り出す装置の開発のために、蓄熱された粒子と水を直接接触させることで、蒸気を発生させる蒸気発生装置の小型モデルの設計・製作と、蓄熱材料の加熱方法の検討、そして、製作された装置を用いて実際に蒸気発生実験を行い、その動作の確認を行うこととする。

1) 工学専攻機械・情報系コース大学院生

2) 機械設計システム工学科教授

3) 機械設計システム工学科助教

4) 教育研究支援技術センター技術専門員

2. 実験装置

2.1 ビームダウン式太陽集光装置

2012年8月に宮崎大学に建設された三鷹光器(株)製ビームダウン式太陽集光装置を図1に示す。ビームダウン式太陽集光装置は、タワー型に大別される集光装置であり、集光部が地上近くに形成されるため地上近くにレシーバを配置できるという利点がある。ビームダウン式太陽集光装置は、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。宮崎大学に設置されているビームダウン式太陽集光装置は、タワー高さが16mで、上部には楕円鏡が配置され、地上から7mの位置に実験用のスペースが用意されている。ビームダウン式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の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。楕円鏡第二焦点付近にはCPCと呼ばれる装置が設置されており、CPCの内部は多数の鏡によって放物線形状となっている。そして、光がCPCを通過することでさらに集光が行われ、集光された光をレシーバなどを用いて蓄熱粒子に照射し、蓄熱を行う。

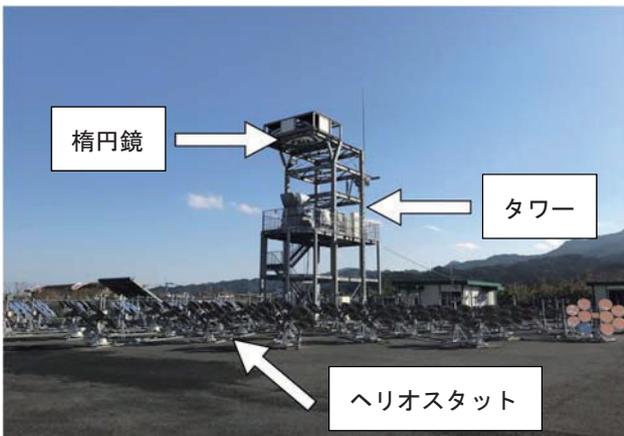


図1. ビームダウン式太陽集光装置.

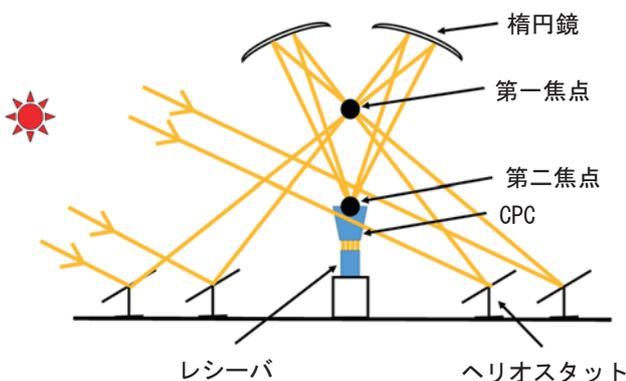


図2. 集光原理.

2.2 蓄熱材料

蓄熱材料は、本実験室の粒子加熱実験で最も用いられている直径5mmのアルミナ球を使用した。アルミナは融点が2015℃と高く、様々な粒径のものを入手しやすいという理由から、本研究室の加熱実験に用いられている。図3にアルミナ球を示し、表1にその諸元を示す。ただし、嵩密度は本研究室で計測した値である。

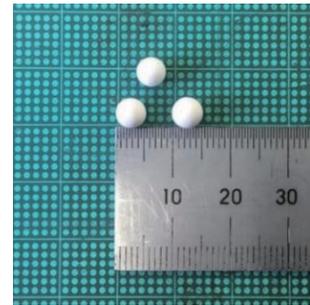


図3. アルミナ球.

表1. アルミナの諸元³⁾.

化学式	Al ₂ O ₃
融点 [°C]	2015
密度 [kg/m ³]	3890
比熱 [kJ/kg·K]	0.779
嵩密度 [kg/m ³]	2150

2.3 蒸気発生装置

図4に熱の取り出し実験に用いる蒸気発生装置の概略図を示す。蒸気発生装置は、ガスポンペを半分に取り、フランジを溶接で付けた外槽部とSUS304製平板の底部から構成されている。底部には蓄熱粒子を入れるための円筒を溶接してある。円筒に関しては2.3.1にて説明をする。また、底部において円筒の溶接を行った面とは反対側の面に管路用のチーズを溶接している。外槽部と底部はM12のボルトとナットで固定される。また、蒸気発生装置は、供給する水の流量を設定するための流量計、データを収録するデータロガー、給水する水の温度を計測するための熱電対①、円筒内のアルミナ球の温度を計測するための熱電対②、発生した蒸気の温度を測定するための熱電対③、発生した蒸気の圧力を計測するブルドン管圧力計と圧力センサ、管路内の圧力が高くなり、蒸気発生装置が破損するのを防ぐための逃し弁、蒸気発生装置内への水の供給を制御するバルブ①、ドレン用のバルブ②、蒸気の放出を制御するバルブ③などから構成される。圧力計は、発生した蒸気の熱で壊れないように、蒸気発生装置から銅パイプを延ばした先に取り付け、バケツに水を貯めた冷却部の中に銅パイプを通すことで、高温の蒸気に触れないようにしている。また、管路の格子線の部分は外径16mmのフレキ管(SUS304)を使用している。

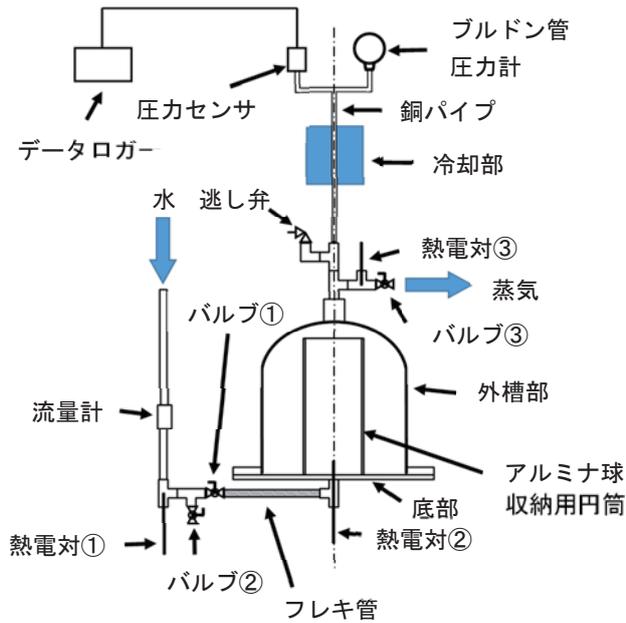


図4. 蒸気発生装置の概略図.

2.3.1 アルミナ球収納用円筒

アルミナ球を入れる円筒の諸元を表2に示す。円筒はSUS304製のシームレス管を使用した。シームレス管の内部にアルミナ球を収納する。収納するアルミナ球の質量を一定とし、円筒の直径を変更することで円筒内のアルミナ球の高さを変更する。円筒の直径に対するアルミナ球の入り高さをアスペクト比としたとき、アスペクト比を変更することによる、発生する蒸気に与える影響を調査するために、3種類の円筒を準備した。約1.4 kgのアルミナ球を円筒に入れる時、アスペクト比が1:5となる円筒を円筒A、アスペクト比が1:1となる円筒を円筒B、アスペクト比が2:1となる円筒を円筒Cとする。また、それぞれの円筒を使用した実験時の円筒内の様子を以下の図5に示す。蒸気発生装置底部には装置の簡略化のために円筒Cを溶接している。アルミナ球の加熱時にはどの円筒を使用した実験の際にも、アルミナ球の加熱状況をそろえるために、円筒Cに円筒Aを入れ、その中にアルミナ球を入れ、アルミナ球の加熱を行った。円筒Aを使用した実験時には、円筒Cの中に円筒Aを入れ、円筒Bを使用した実験時には、円筒Cの中に円筒Bを入れて実験を行った。

表2. アルミナ球収納用円筒諸元.

円筒	A	B	C
アスペクト比	1:5	1:1	2:1
内径 [mm]	55	96	120
外径 [mm]	61	102	130
長さ [mm]	295	295	295
アルミナ球高さ [mm]	275	91	60
円筒質量 [g]	1277	2180	4588

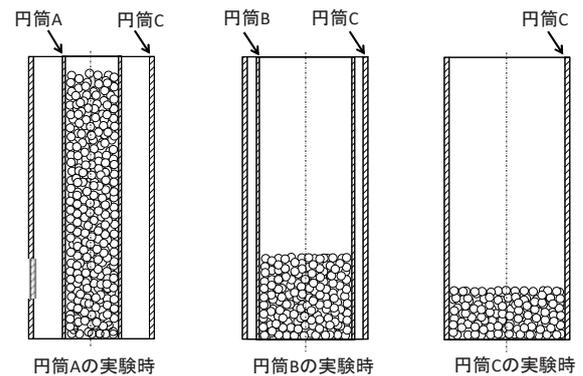


図5. 蒸気発生実験時の円筒内の様子.

3. 蒸気発生実験

3.1 粒子加熱方法

アルミナ球加熱時の概略図を以下の図6に示す。外槽部を外し、円筒にアルミナ球を入れ、エンジンにつないだフレキ管をアルミナ球の中まで差し込み、アルミナ球の間にエンジンの排気を通すことで、アルミナ球の加熱を行った。円筒上端付近の温度が目標温度である480℃よりも高い500℃になるまで加熱を行った。

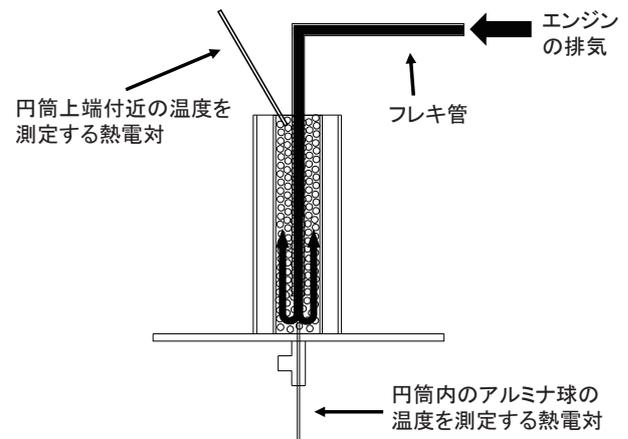


図6. アルミナ球加熱方法.

3.2 蒸気発生実験方法

円筒上端付近のアルミナ球を500℃まで加熱し、外槽部を取り付け、実験条件をそろえるために円筒内のアルミナ球の温度を測定する熱電対の計測温度が480℃になるまで待ち、バルブ③を閉じた状態で4.7 g/s (280 mL/min)の流量で水を供給した。蒸気を発生させ、蒸気発生装置内の圧力が上昇し、圧力が上昇しなくなった後、バルブ③を開き蒸気を大気に開放した。

3.3 実験条件

実験条件を表3に示す。蒸気を発生させるために使用するアルミナ球の温度は、480℃とする。蒸気発生実験は、宮崎大学に設置されているビームダウン式太陽集光装置を用いたアルミナ球加熱実験にて蓄熱されたアルミナ球を使用することを想定しているため、アルミナ球

加熱実験において、最高温度を記録した 2017 年 1 月 24 日の実験ときの平均温度である 483 °C²⁾ をもとにアルミナ球温度を決めた。また、アスペクト比を変化させたときに実験条件をそろえるために、円筒底から 30 mm の位置のアルミナ球温度が 480 °C になった時に水の供給を開始する。円筒底からの位置は、アスペクト比を 2 : 1 としたときに円筒底から約 60 mm の位置までアルミナ球が詰められることになるため、温度を測定する熱電対の先がアルミナ球から突きださないようにするため、円筒底の温度の影響を受けにくくするため、アルミナ球高さの 60 mm の半分の 30 mm の位置を温度測定位置とした。アルミナ球の質量は、円筒の直径を変化させたときに、アルミナ球に蓄熱された熱量を一定とするため、どの円筒を使用した実験の場合も同じ質量のアルミナ球を使用することとした。円筒の直径を変更したときに、アルミナ球のアスペクト比が 1 : 5、1 : 1、2 : 1 となるように、アルミナ球の量の計算を行った結果、1.4 kg となった。また、現在の装置で発生させることができる蒸気の最大の圧力と、アルミナ球の量を変化させることで発生する蒸気に与える影響を調査するために、現在の装置で最大量のアルミナ球を入れることができる円筒 C を使い、円筒上端まで約 7 kg のアルミナ球を詰め、同様の実験を行った。発生させる蒸気の体積流量の目標値を本研究室で設計製作された太陽熱発電用レシプロエンジン⁴⁾を駆動させた実績のある蒸気の流量である 470 NL/min としたとき、必要な水の供給量を算出すると 280 mL/min となったため、水の供給量は 280 mL/min とした。

表 3. 実験条件.

円筒	A	B	C
アスペクト比	1:5	1:1	2:1
アルミナ球質量 [kg]	1.4		7.0
アルミナ球温度 [°C]	480		
供給水流量 [mL/min]	280		

3.4 実験結果

円筒 A を使用した実験の結果を図 7 に、円筒 B を使用した実験の結果を図 8 に、円筒 C を使用した実験の結果を図 9 に、円筒 C を使用し、アルミナ球質量を 7.0 kg とした実験結果を図 10 に示す。実験結果のまとめを表 4 に示す。グラフには縦軸に圧力センサで計測した圧力と熱電対³⁾で計測した温度を示し、横軸にアルミナ球温度が 480 °C となった時を 0 としたときの経過時間を示している。そして、点線の位置がバルブを開放した時間を表している。最高圧力の値は、ブルドン管圧力計にて読み取った値を用いている。表 4 に示す単位時間当たりの蒸気発生量は、蒸気発生装置の容積と最高圧力の関係から蒸気発生量を求め、蒸気発生量を蒸気発生時間で除することで求めた。

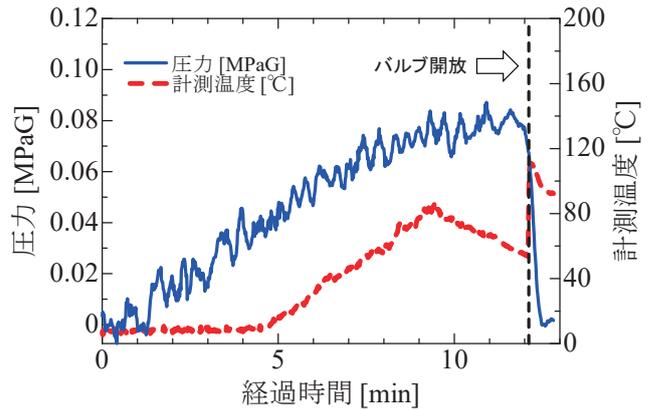


図 7. 円筒 A を用いた蒸気発生実験結果.

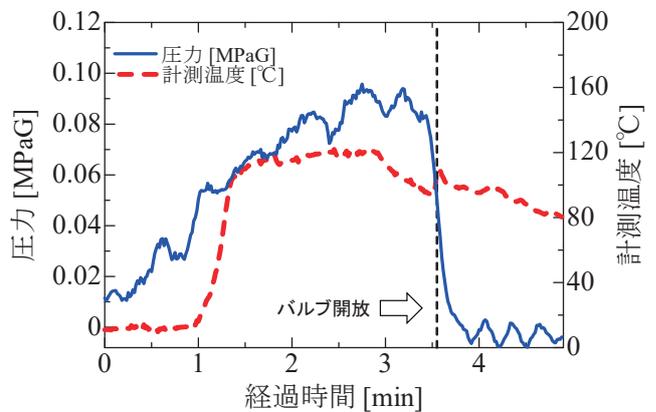


図 8. 円筒 B を用いた蒸気発生実験結果.

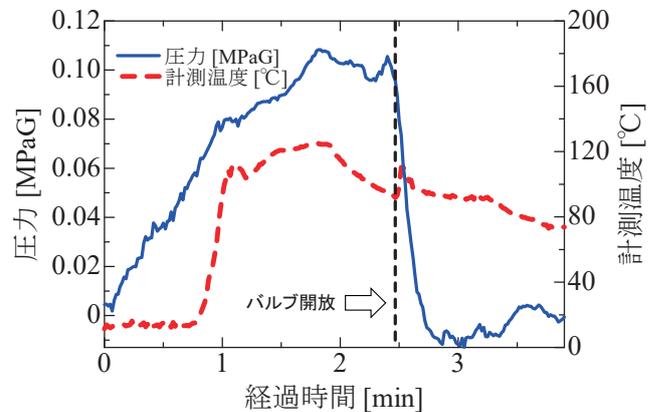


図 9. 円筒 C を用いた蒸気発生実験結果.

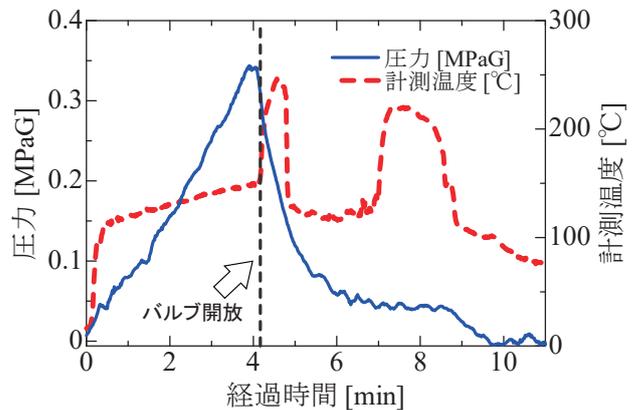


図 10. アルミナ球の量を増やした実験結果.

表 4. 実験結果.

円筒	A		B		C	
アスペクト比	1:5		1:1		2:1	
円筒断面積 A [m ²]	0.0024		0.0073		0.011	
蒸気体積 V [m ³]	0.011		0.0109		0.0111	
発生した蒸気量 m [g]	12.4		12.3		12.6	
実験回数	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
最高圧力 [MPaG]	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.11
蒸気発生時間 t [s]	571	621	169	173	109	104
単位時間当たりの蒸気発生量 \dot{m} [g/s]	0.022	0.020	0.073	0.071	0.12	0.12

3.5 考察

それぞれの円筒を用いた実験において、最高圧力を比較すると、円筒 A を使用した実験が最も低く、円筒 B を使用した実験が最も高いことが分かる。これは、蒸気が発生する時間が長い円筒 A を使用した実験の際には先に発生した蒸気が蒸気発生装置内壁に触れ、蒸気が冷やされることで蒸気が凝縮し、体積が減少したことによって圧力が低くなっているのではないかと考えられる。発生した蒸気が凝縮し圧力が低下したとすると、それぞれの円筒による最高圧力の変化は少なく、同じ質量のアルミナ球を用いた時、円筒を変更したことによる総蒸気量の変化は少ないと考えられる。

それぞれの円筒において、最高圧力まで上昇するのに経過した時間を比較すると、円筒 A を使用した実験が最も長く、円筒 C を使用した実験が最も短くなっている。これは、円筒を変化させたことで、円筒の断面積が変化し、単位時間あたりにアルミナ球と水が触れる量に変化したためであると考えられる。その結果、単位時間あたりに発生する蒸気の量が変化したため、蒸気発生時間が変化したと考えられる。

以上の実験結果より、短い時間で最高圧力に達している円筒の直径が大きいものほど、単位時間あたりに発生する蒸気量は多くなる傾向があると言える。円筒の直径が大きくなると円筒の断面積もそれに伴って大きくなる。よって、円筒の断面積と単位時間あたりに発生する蒸気量の関係を求めることで、蒸気発生装置の特徴を知ることができるのではないかと考えられる。そこで、単位時間あたりの蒸気発生量と断面積との関係を図 11 に示す。図 11 のグラフの縦軸に単位時間当たりの蒸気発生量を示し、横軸に円筒の断面積を表している。

図 11 から、単位時間当たりの蒸気発生量は円筒の断面積に比例し、円筒断面積が増加すると単位時間当たりの蒸気発生量も増加する傾向があるとわかる。この円筒断面積と蒸気発生量の関係が直線的に変化しているのは、以下の式 (1) からわかる。蒸気発生量 \dot{m} [g/s] に水 1 kg 当たりの加熱量 h [J/g] をかけたものを断面積 A [m²] で割

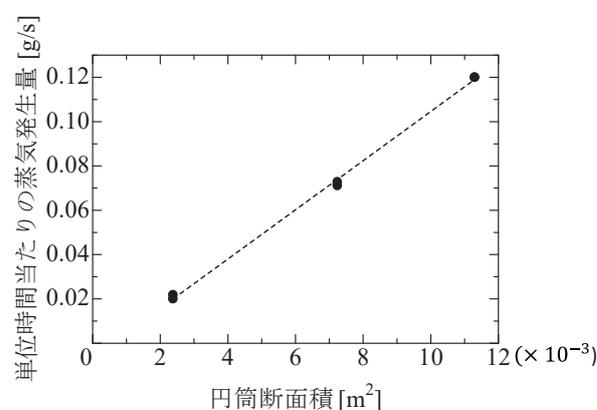


図 11. 単位当たりの蒸気発生量と円筒断面積の関係.

ることで、熱流束 q [W/m²] を求めることができるのではないかと考えられる。加熱量 h [J/g] は、大気圧で 15 °C の水が 0.1 MPaG の飽和水蒸気に変化するまでに必要な水 1 kg 当たりの熱量である。アルミナ球が均一に加熱されているとすると、円筒内の熱流束 q [W/m²] はほぼ一定になると考えられる。そのため、単位時間当たりの蒸気発生量と円筒断面積には比例関係があるのではないかと考えられる。

$$q = \dot{m} \cdot h / A \quad (1)$$

次に、円筒 C を使用し、アルミナ球の量を約 7.0 kg に増加させて行った実験結果である図 10 から、その他の条件の実験と同様にして単位時間当たりの蒸気発生量を算出した結果、0.11 g/s となった。この単位時間当たりの蒸気発生量を 1.4 kg のアルミナ球と円筒 C を使用した実験の単位時間当たりの蒸気発生量の平均である 0.12 g/s と比較しても、ほぼ等しい値となっている。このことから、アルミナ球の量を変化させても、単位時間当たりの蒸気発生量は、変化しないと考えられる。したがって、アルミナ球の量を変化させたとしても、単位時間当たりの蒸気発生量は円筒の断面積に比例するのではないかと考えられる。単位時間当たりの蒸気発生量を \dot{m} [g/s]、円筒断

面積を $A [m^2]$ として図 11 の直線を式 (2) に示す。

$$\dot{m} = 10.9A - 0.0056 \quad (2)$$

式 (2) より、本研究室で研究が行われている太陽熱発電用レシプロエンジン⁴⁾を駆動させるために必要な蒸気発生装置の条件を求める。太陽熱発電用レシプロエンジンを駆動させるためには過去の研究で太陽熱発電用レシプロエンジンを駆動させた実績のある 4.7 g/s (470 NL/min) の過熱蒸気の流量が必要である。この流量と式 (2) を用いて、必要な断面積 A を計算する。その結果、必要断面積 A は 0.43 m^2 となった。また、今回の実験は装置の構造上どの円筒を使用した実験においても、水位の上昇速度がほぼ変わらなくなっている。これは、蒸気発生装置底部には円筒 C のみが溶接されており、円筒 A や円筒 B を用いた実験の際は、円筒 A や円筒 B のみに水が供給されるのではなく、円筒底部の隙間から水が漏れる。その結果、円筒 C 内全体に水が供給されることとなるため、水位の上昇速度がほぼ変わらなくなっている。そのため、計算結果の断面積は、今回の実験と同じ水位の上昇速度にすることで、目標である太陽熱発電用レシプロエンジンを駆動させることができる流量の蒸気を発生させられると考えられる。そこで、断面積を 0.43 m^2 としたときの水位の上昇速度を一定とするために必要な水の供給量を求める。今回の計算は、代表して円筒 C の断面積を用いて計算を行った。水の供給量は円筒断面積に比例するので、必要な円筒断面積は円筒 C の断面積の約 38 倍となっている。よって、今回の実験の供給量である 4.7 g/s (280 mL/min) を 38 倍した 178 g/s で水を供給することで、断面積を大きくした場合も水位の上昇速度が今回の実験の水位の上昇速度と等しくなると考えられる。したがって、太陽熱発電用レシプロエンジンを駆動させた実績のある流量の蒸気を発生させるためには、断面積が 0.43 m^2 である円筒の中に平均温度が $480 \text{ }^\circ\text{C}$ に蓄熱が行われたアルミナ球を入れ、 178 g/s で水を供給する必要がある。

4. おわりに

エンジンの排気を用いたアルミナ球加熱装置の設計・製作とアルミナ球と水を直接接触させることで蒸気を発生させる蒸気発生装置の小型モデルの設計・製作を行い、この装置を用いて、蒸気を発生させる実験を行うことで以下の結論を得た。

1. 設計・製作を行った装置を用いて、アルミナ球を目標温度まで加熱することができ、アルミナ球と水を直接接触させることで蒸気を発生させることができた。
2. 水位の上昇速度とアルミナ球の温度が等しい時、アルミナ球が入っている円筒の断面積と単位時間当たりの蒸気発生量は比例関係があることがわかった。
3. 太陽熱発電用レシプロエンジンを駆動させることができる流量の蒸気を発生させるためには、断面積が 0.43 m^2 である円筒の中に平均温度が $480 \text{ }^\circ\text{C}$ のアルミナ球を入れ、 178 g/s で水を供給する必要があることがわかった。

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 第 5 章 太陽熱発電・太陽熱利用一、2014.
- 2) 前田順登：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、平成 28 年度 宮崎大学卒業論文、2017.
- 3) 社団法人 日本機械学会：伝熱工学資料 改訂第 4 版、社団法人 日本機械学会、p.320、1986.
- 4) 安在晋太郎：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良）、平成 28 年度 宮崎大学卒業論文、2017.