



## 粒子流動型レシーバのための蓄熱粒子持ち上げ装置 の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2023-11-01 キーワード (Ja): キーワード (En): Solar Thermal Receiver, Particle lifting device, Solar heat, Solar concentrator 作成者: 俵, 彰吾, 長瀬, 慶紀, 友松, 重樹, 木村, 正寿 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10458/0002000281">http://hdl.handle.net/10458/0002000281</a>

# 粒子流動型レシーバのための蓄熱粒子持ち上げ装置の開発

俵 彰吾<sup>a)</sup>・長瀬 慶紀<sup>b)</sup>・友松 重樹<sup>c)</sup>・木村 正寿<sup>d)</sup>

## Development of Heat Storage Particles Lifting Device for Solar Thermal Receiver

Shogo TAWARA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATU, Masatoshi KIMURA

### Abstract

In recent years, renewable energy sources that do not emit carbon dioxide, such as solar thermal power systems, have been attracting worldwide attention. Therefore, we are conducting research on solar thermal power systems using a beam down solar concentrator at the University of Miyazaki. The objective of the research is to develop a lifting device that continuously supplies thermal storage particles for use in solar thermal power systems. In this paper, air conveying device was produced and tested. As a result, not all particles could be lifted on condition that using the screw feeder. When lifting particles to height of more than 1.5m, the lifting method should be re-examined.

**Keywords:** Solar Thermal Receiver, Particle lifting device, Solar heat, Solar concentrator

### 1. はじめに

現在、日本国内におけるエネルギー消費量は1973年に比べ、2011年では約2.4倍になっており、発電比率はほとんどが原子力発電と火力発電が占めている。東日本大震災後は原子力発電の長期運転休止により、火力発電の発電比率を約9割まで上昇させている。火力発電は二酸化炭素を大量に排出し、地球温暖化の原因の一つである温室効果ガスを増加させ、低炭素社会の実現とは程遠いものである。また、エネルギー資源である化石燃料の石油も海外の輸入に頼っており、国内で安定した供給できるエネルギーが求められている。そこで近年、温室効果ガスを削減するために、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーが世界的に注目を浴びている。再生可能エネルギーにはバイオマス火力発電や水力発電、地熱発電などが挙げられ、太陽光の熱を用いて発電する太陽熱発電もその一つである<sup>1)</sup>。

太陽熱発電の特徴としては、太陽光を熱に変換するため、太陽光発電と比較した際に、雲による発電量の変動が小さくなるのが分かっており、安定した発電量が得られる点が挙げられる。また、蓄熱システムを導入すると、太陽光が得られない夜間などでも、電力を供給することが可能となる<sup>2)</sup>。

太陽熱発電では、ビームダウン式太陽集光装置で集光した太陽光を加熱部であるレシーバに照射し、レシーバ内にあらかじめ投入された蓄熱粒子を加熱する。加熱された蓄熱粒子は、スクリーフィーダで一定量取り出され、気密

性を保つためのバルブを介して、熱交換器に投入される。熱交換器に投入された蓄熱粒子は圧縮空気と熱交換を行い、熱交換を行った圧縮空気は熱機関を駆動させることで発電を行う。太陽熱発電の概略図を図1に示す。熱交換した後の蓄熱粒子は、レシーバより下の位置で排出される。太陽熱発電は連続的に発電を行えることが重要であり、熱交換後にレシーバ下方へ排出された粒子を再びレシーバまで持ち上げて、再度加熱することが必要である。しかし、粒子をレシーバまで持ち上げる装置はこれまで開発が行われていなかった。そこで蓄熱粒子持ち上げ装置の開発を本研究の目的とする。

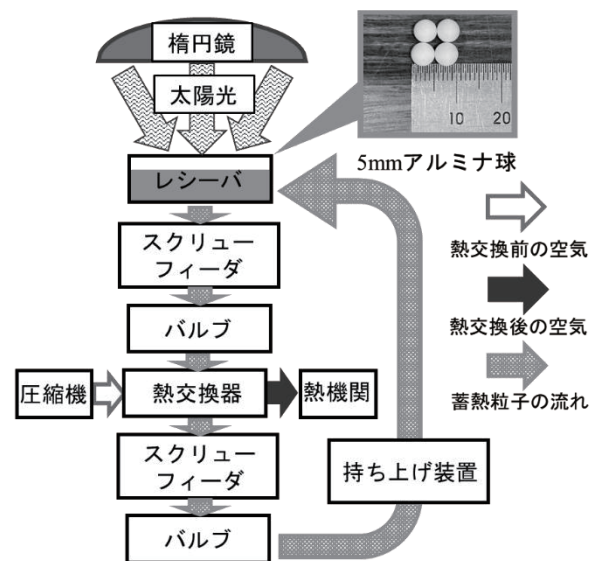


図1 連続的な太陽熱発電の流れ

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生  
 b)工学科機械知能工学プログラム教授  
 c)工学科機械知能工学プログラム助教  
 d)教育研究支援技術センター技術専門職員

## 2. 実験装置

### 2.1 粒子持ち上げ装置

蓄熱粒子を地面から高さ1.5mにあるレシーバまで搬送する装置として、複数の案を検討した。レシーバまで確実に粒子を持ち上げることでできる搬送能力があることや、装置の構造が単純であることなどを項目として◎○△×の4段階で評価した。表1にそれぞれの案と評価を示す。

表1 持ち上げ装置の案とその評価

	スクリーンコンベア	ベルトコンベア	チェーンバケット	電磁弁による搬送	磁力による搬送	穴あき金属板での搬送	空気搬送
搬送能力	△	○	○	○	×	△	○
構造	△	△	△	×	△	△	◎
耐熱性	○	○	○	×	×	×	○
制御	△	○	○	○	○	○	○
メンテナンス性	△	○	△	△	△	△	△
スペース	△	○	○	○	○	△	○
コスト	○	○	○	△	△	△	○
消費電力	○	○	○	○	○	○	△

表1より、ベルトコンベア、チェーンバケット、電磁弁による搬送、空気搬送の4つが搬送能力において評価が高かったが、その中でも構造が簡単である空気搬送を採用し、粒子持ち上げ装置を製作した。図2に製作した粒子持ち上げ装置の概略図を示す。

粒子持ち上げ装置は、空気で粒子を持ち上げる管路に塩ビ管を用い、地面から高さ1.5mに持ち上げられた粒子の排出口を設けた。塩ビ管内に送る空気は、スライダックにより、風速を調節できるようにしたブロワを用いた。ブロワからの風速を調べるため、塩ビ管内に熱線流速計を設置した。図3に示す台形ねじスクリーフィーダを用いて、持ち上げる粒子を塩ビ管内に投入した。台形ねじスクリーフィーダとは、モータの回転運動で台形ねじを回転させ、ケース内の粒子を押し出すようにして、一定量を排出する装置である。スクリーフィーダケースには粒子の投入口と排出口が1つずつあり、粒子持ち上げ装置では、スクリーフィーダの排出口から塩ビ管内に投入される。

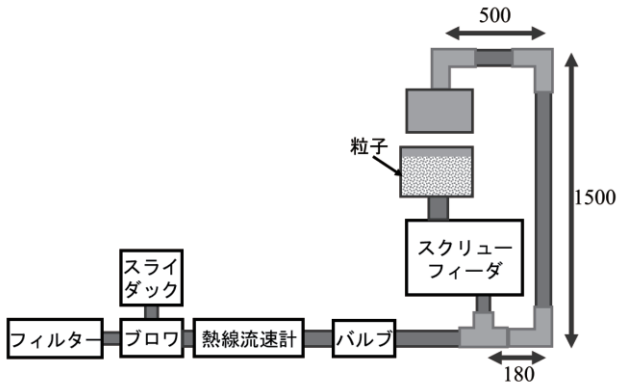


図2 粒子持ち上げ装置の概略図

### 2.2 粒子持ち上げ装置の動作原理

粒子の持ち上げ装置の動作原理は、まずブロワから風を送り、熱線流速計で管内の流速が安定したことを確認した

ら、バルブを閉じ、一度管内に風が送られないようにする。管内に風が送られない状態で、スクリーフィーダの台形ねじを1回転させ、塩ビ管内に粒子を投入する。その後、バルブを開くことでブロワからの風が一気に管内に送られ、粒子に働く空気抵抗により粒子を持ち上げる仕組みになっている。本論文では、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で使用することを想定し、地面から垂直上向きに高さ約1.5mに塩ビ管の粒子排出口を設けている。

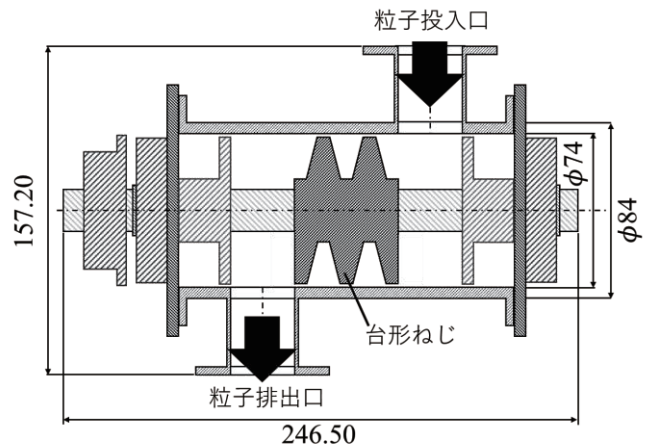


図3 台形ねじスクリーフィーダの概略図

### 2.3 蓄熱粒子

現在の太陽熱発電に用いられている主な蓄熱媒体を以下に示す。

#### 2.3.1 熔融塩

太陽熱発電で使用される熔融塩は主に硝酸塩系である。硝酸塩系の熔融塩は安全性や低コストであることから幅広く使われており、最高温度は550℃程度まで上げられるが、融点が230℃と高い。そのため、常に融点の40~50℃以上高い状態を保つための加温を行う必要があり、エネルギー消費量が大きくなる<sup>2)</sup>。

#### 2.3.2 コンクリート

コンクリートやセラミックを用いた蓄熱システムは、コンクリート・セラミックの躯体中に配管によって熱媒を通して熱交換を行う。安価なコンクリートなどを用いることなどでコストを抑えることができるが、固体媒体と熱媒間との熱交換効率を上昇させることが課題とされている<sup>2)</sup>。

#### 2.3.3 固体粒子

蓄熱媒体として固体粒子の砂がある。砂は砂漠地帯に豊富にあり、非常に安価というメリットがある。実際に砂を蓄熱媒体にした固体粒子充填レシーバの開発が行われている<sup>3)</sup>。

本研究室では固体粒子の中でも直径5[mm]のアルミナ

球を蓄熱媒体に使用し、ビームダウン式太陽集光装置を用いた太陽熱発電を行うことを考えている。そこで、今回製作した空気搬送による粒子持ち上げ装置には、粒子直径と材質の変化によって搬送にかかる時間と1分間に搬送できる量を見るため、アルミナ球については直径3、5 mm、ステンレス球で直径5 mmの3種類を非加熱の状態で使用した。以下の表2にそれぞれの粒子の密度を示す。

表2 各粒子の密度

	密度[kg/m <sup>3</sup> ]	重さ[mg/個]
アルミナ球 3 mm	3602	58
アルミナ球 5 mm	3584	242
ステンレス球 5 mm	7915	517

### 3. 粒子搬送実験

#### 3.1 搬送可能な粒子量の計測

##### 3.1.1 搬送可能な粒子量の計測目的

製作した粒子持ち上げ装置で、搬送可能な粒子量を計測する目的は、1分間に搬送できる最大の粒子量を明らかにするためである。そこで、スクリーフィーダを1回転させ、粒子の排出にかかる時間、またその時排出された粒子の質量を明らかにする必要がある。そこで、1回の搬送にかかる時間とインターバルを計算により求めた。ここでのインターバルは粒子の搬送が終わった瞬間から次の搬送が開始できるようになるまでの時間と定義する。

##### 3.1.2 インターバルの計算

粒子搬送が終わった時から、次に搬送が行えるようになるまでの1インターバルは、以下の図4に示すスクリーフィーダの排出口から管路の底面までを想定し、計算により求めた。以下に計算式を示す。

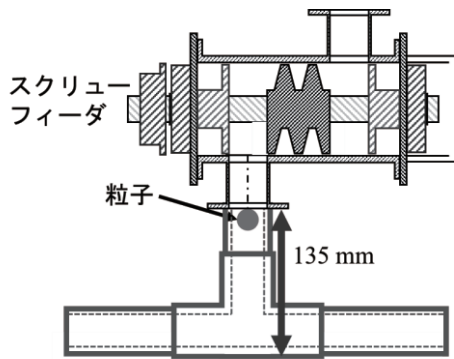


図4 インターバルの計算の概略図

$$y = V_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

式(1)に粒子の初速度  $V_0 = 0 \text{ m/s}$ 、スクリーフィーダから塩ビ管内底面までの高さ  $y = 0.135 \text{ m}$  を代入し、スクリーフィーダから粒子が自由落下するまでの時間  $t$

[s]を求めた。スクリーフィーダの回転時間にはモータの回転数を回転速度[rps]で割ることで求めた。粒子が自由落下する時間とスクリーフィーダの回転時間の和をインターバルとして求めた。

##### 3.1.3 搬送のみにかかる時間の計算

粒子を投入する時間を含めない、搬送のみにかかる時間を計算により求めた。

$$F = \frac{1}{2} \rho_f v_f^2 S C_d \quad (2)$$

$F$ : 抗力 [N]

$\rho_f$ : 空気の密度  $1.293 \text{ kg/m}^3$

$v_f$ : 計測した流速 [m/s]

$S$ : 粒子の断面積 [m<sup>2</sup>]

$C_d$ : 抗力係数  $0.47$  <sup>4)</sup>

$$a_x = \frac{F}{m} \quad (3)$$

$a_x$ : 水平方向の粒子の平均加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$m$ : 粒子の質量 [kg]

$$V_1 = \sqrt{2a_x \Delta x} \quad (4)$$

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + 2a_x \Delta x} \quad (5)$$

$V_1$ : 粒子の初速度 [m/s]

$V_2$ :  $V_1$ より  $\Delta x$ 進んだ粒子の速度 [m/s]

$\Delta x = 0.01 \text{ m}$

$$t_x = \frac{\Delta x}{\frac{V_2 - V_1}{2}} \quad (6)$$

$t_x$ : 水平方向の搬送にかかる時間 [s]

式(2)には空気の密度  $\rho_f$ : [kg/m<sup>3</sup>]、熱線流速計で計測した流速  $v_f$  [m/s]、粒子の断面積  $S$  [m<sup>2</sup>]、粒子の形状である球体に働く抗力係数  $C_d = 0.47$  を代入して粒子に働く抗力  $F$  [N]を求めた。式(3)では抗力  $F$  [N]を粒子の質量  $m$  [kg]で割ることで粒子の水平方向の平均加速度  $a_x$  [m/s<sup>2</sup>]を求めた。式(4)より、粒子の初速度  $V_1$ を求め、速度  $V_1$ で  $0.01 \text{ m}$ 先に進んだ時の粒子の速度を  $V_2$ とし、式(5)より求めた。式(6)では  $\Delta x = 0.01 \text{ m}$ を速度差の平均で割ることで  $\Delta x$ 間を水平方向に搬送される粒子の時間を求めた。この求めた時間を予備実験装置の搬送距離だけ積算し、搬送にかかる時間とした。位置  $0.01 \text{ m}$ 以降では先ほど求めた  $V_1$ と  $V_2$ を用いて流体と粒子の相対速度を考慮した抗力を求めた。また、垂直方向の搬送では、粒子の平均加速

度を求める式 (3) から重力加速度を引くことで求めた。垂直方向の抗力は、式 (2) の  $v_f$  に計測した流速から  $V_1$  と  $V_2$  の平均速度を引いた値を代入して求めた。

以上の計算過程を得て、粒子の搬送のみにかかる時間を求めた。インターバルと搬送のみにかかる時間を合わせた搬送にかかる時間の計算結果は、計測結果とともに図 4 に示す。

### 3.1.4 搬送にかかる時間の計測

計算で求めた搬送にかかる時間と実際の搬送にかかる時間との差を調べるため、粒子持ち上げ装置を用いた搬送にかかる時間の計測を行った。計測条件を以下の表 2 に示す。計測条件の管内の流速はブロウの出力をスライダックによって調節し、ブロウを開いた状態での熱線流速計で計測した最大流速である。

表 2 搬送にかかる時間の計測条件

パイプの内径 [mm]	25.6
高さ方向のパイプ長さ [m]	1.5
管内の空気の流速 [m/s]	40
モータの回転速度 [rps]	1.2
実験回数 [回]	30
粒子の種類 (直径 [mm])	アルミナ球 (3, 5) ステンレス球 (5)

### 3.1.5 搬送にかかる時間と粒子量の計測結果と考察

スクリーフィーダを取り付けた垂直管路の搬送にかかる時間の計測結果と計算結果を図 5 に示す。また、各粒子 1 回分の搬送にかかる時間とその時搬送された粒子の重さから、1 分間に搬送できる最大排出流量を求めた。図 6 に最大排出流量を示す。

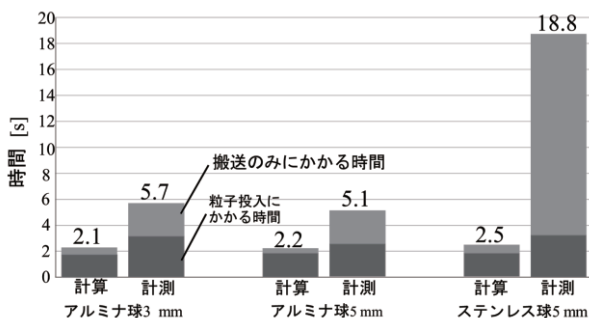


図 5 垂直管路の搬送にかかる時間

図 5 より、アルミナ球 3 mm と 5 mm において、計測した搬送にかかる時間に大きな差はなかった。このことから、アルミナ球の直径が 3 ~ 5 mm の間では搬送にかかる時間に粒子の直径が大きく影響しないことが分かる。ステンレス球についてはアルミナ球と比較して密度が大きく、搬送されずに管内に残るものもあり、搬送にかかる時間もアルミナ球と比べて長かった。また、粒子の材質や直径に関

わらず、搬送にかかる時間は、計算で求めた値より計測結果の方が遅くなった。原因として、エルボ内壁に粒子が衝突し、計算よりも粒子の速度が低下したことが考えられる。ステンレス球が持ち上げられなかった理由として、図 7 に示すように、管内に投入された粒子が管路の長さ方向に分布し、位置によって粒子の加速距離が異なることが考えられる。粒子が持ち上がるエルボ部分から遠い位置にある粒子は加速する距離が長いので持ち上がりやすく、エルボに近い粒子ほど加速する距離が短いため、持ち上がりにくくなると考えられる。この加速距離の差はアルミナ球を投入した時も生じていると考えられるが、アルミナ球の密度はステンレス球の半分以下であるため、今回の計測条件の流速 40 m/s では十分に持ち上げられているものと考えられる。

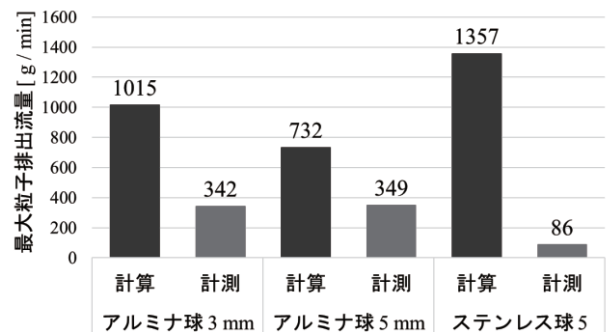


図 6 垂直管路の最大粒子排出流量

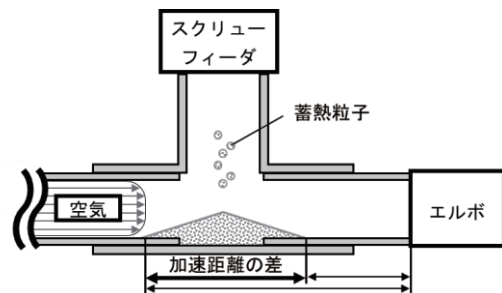


図 7 加速距離の差のイメージ

図 6 より、1 回に搬送される粒子量の計測から求めた、1 分間当たりの最大粒子排出流量が、計算で求めた値より少なくなっている。これは、搬送にかかる時間が、計算で求めた時間より遅くなっているためである。計算より遅くなった理由は、スクリーフィーダからの空気の漏れによって、熱線流速計に表示されている流速より下がっていることが考えられる。よって、1 分間に搬送できる回数が計算で求めた値より少なくなることで、排出できる粒子の量が減っている。特にステンレス球は、投入された粒子の半分も搬送できなかったため計算で求めた値より極端に小さくなっている。

よって、垂直管路ではアルミナ球は搬送可能であるが、ステンレス球の連続的な搬送は困難であり、1 分間に搬送できる最大の粒子量はアルミナ球 5 mm で約 350 g になると考えられる。

### 3.2 持ち上げ装置の管路の改良

垂直管路の粒子持ち上げ装置では、管内に投入されたステンレス球の半分も持ち上げることができなかった。その原因として、粒子が投入された位置から、地面と垂直上向きに持ち上げられる位置までの距離が 180 mm であり、粒子の加速する区間が短いのではないかと考えた。そこで、管内に投入された粒子が、ブロウの風を受けて水平方向に加速する区間を増やすために、粒子が持ち上げられるエルボまでの管路を 2420 mm まで延長した。また、粒子を持ち上げる管路は、90° エルボから 45° エルボに変更し、地面に対して垂直だったものを 45° にすることで、エルボ内壁で衝突する粒子を少なくし、より排出されやすいように改良を加えた。管路改良後の粒子持ち上げ装置を図 8 に示す。

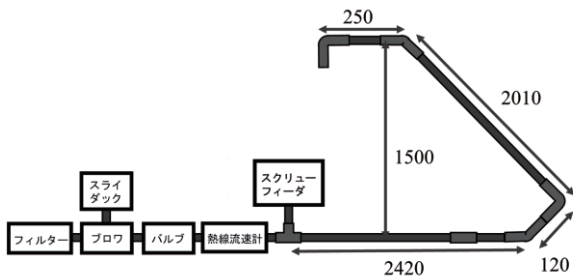


図 8 管路改良後の持ち上げ装置の概略図

#### 3.2.1 管路改良後の粒子搬送実験目的

管路を延長することで、ブロウの風によって粒子が加速する距離を延長し、角度の緩いエルボを用いた持ち上げ装置では、ステンレス球の搬送にかかる時間と粒子排出流量が改善されているかを確認することを目的とした。

#### 3.2.2 管路改良後の粒子搬送実験条件

以下の表 3 に、管路改良後の粒子搬送実験条件を示す。管内の流速は、管路を延長したことによる管路摩擦等による損失で、垂直管路の時より流速が低下したと考えられる。

表 3 管路改良後の粒子搬送実験条件

パイプの内径 [mm]	25.6
装置全体の高さ [m]	1.5
管内の空気の流速 (エルボ前での実測値) [m/s]	30.7
実験回数	10
粒子の種類 (直径 [mm])	ステンレス球 (5)
モータの回転速度 [rps]	1.2

#### 3.2.3 管路改良後の粒子搬送実験結果と考察

粒子持ち上げ装置の管路改良前後で、粒子搬送にかかる時間の結果を図 9 に示す。図 9 より、搬送にかかる時間は改良前の装置で計算で求めた値の約 12 倍、改良後の装置では約 14 倍の時間をかけて粒子が排出された。1 回の搬

送にかかる時間は改良前の装置に比べ 5 秒以上早く排出された。また、改良前後の粒子排出量については、図 10 に示す。図 10 より、1 回当たりの粒子排出量は垂直管路より約 2 倍以上多く排出されていることがわかった。

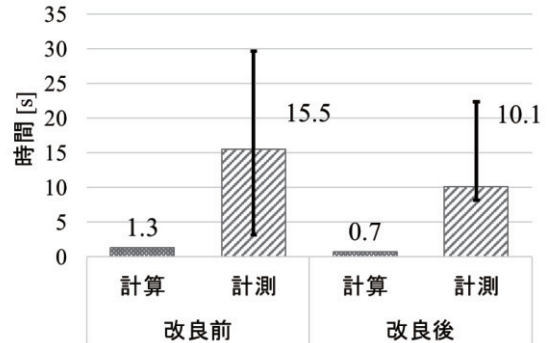


図 9 管路改良前後の搬送にかかる時間

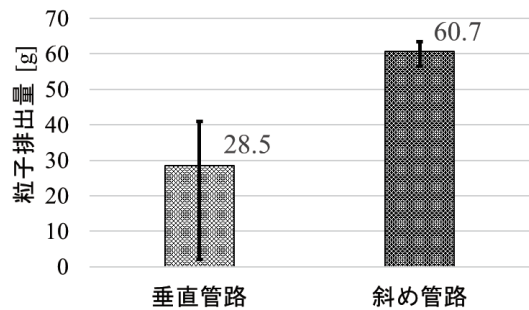


図 10 管路改良前後の 1 回あたりの粒子排出量

よって、加速距離の延長と管路を 45° 傾けることは搬送にかかる時間を減らし、粒子排出量を増加させることに有効であることがわかった。

### 3.3 粒子持ち上げ装置の気密性の改良

垂直管路を、90° から 45° に傾けることで、搬送にかかる時間を短くし、搬送する粒子量を増加させることができた。しかし、粒子の投入を行うスクリーフィーダケースと管路の隙間から、ブロウから送られてくる空気が漏れており、管内の流速が低下していた。そこで、粒子の投入を行うスクリーフィーダを 2 つの塩ビボールバルブへ変更した。以下の図 11 に気密性の改良を行った粒子持ち上げ装置の概略図を示す。

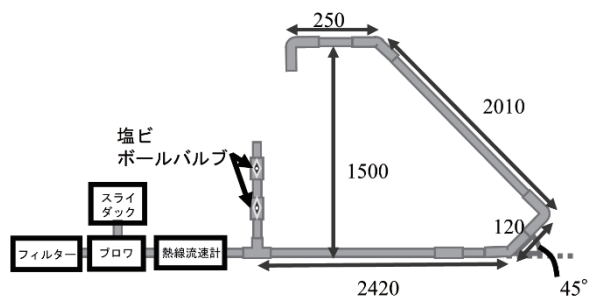


図 11 気密性改良後の持ち上げ装置の概略図

2つのバルブは交互に開閉を行うことで、ブロウから送られてくる空気を漏らすことなく管内へ粒子を投入することができる。

### 3.3.1 気密性改良後の粒子搬送実験目的

斜めに傾けた粒子持ち上げ装置のスクリューフイーダを外し、2つの塩ビボールバルブを取り付けて、気密性を改良した。気密性を改良した斜め管路の持ち上げ装置を用いて、アルミナ球 3 mm、アルミナ球 5 mm、ステンレス球 5 mm の3種類の粒子が空気の漏れによる搬送にかかる時間と搬送量についての影響を確認するため実験を行った。

### 3.3.2 気密性改良後の粒子搬送実験条件

以下の表 4 にバルブを取り付けた斜め管路の粒子搬送実験条件を示す。管内の流速は 45°エルボ手前で計測を行った値を用いて実験条件に設定した。使用する粒子の量はスクリューフイーダが一回転するときの平均排出量をボールバルブへ投入した。

表 4 気密性改良後の粒子搬送実験条件

パイプの内径[mm]	25.6	
装置の高さ [m]	1.5	
管内の流速[m/s]	36.3	
実験回数 [回]	10	
使用する粒子 (直径 [mm])と 粒子量[g/回]	アルミナ球 (3)	39.0
	アルミナ球 (5)	31.0
	ステンレス球 (5)	71.5

### 3.3.3 気密性改良後の粒子搬送実験結果と考察

スクリューフイーダを取り付けた改良後の持ち上げ装置とバルブを取り付けた持ち上げ装置で搬送にかかる時間を図 12 に示す。

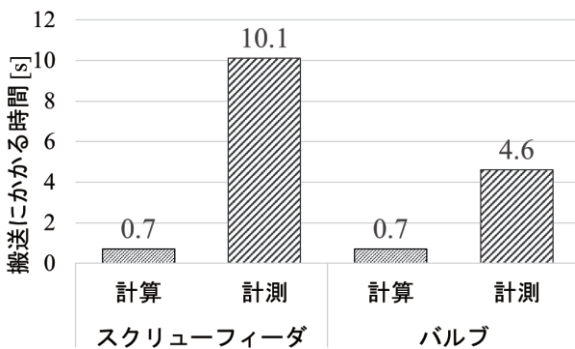


図 12 斜めにした管路の粒子搬送実験結果

図 12 より、搬送にかかる時間はスクリューフイーダでステンレス球を投入する場合は、空気の漏れが生じていたため、計算で求めた値の約 14 倍の時間がかかって搬送されていた。しかし、バルブで気密性を保った管路で粒子の搬送を行うと、計算で求めた時間の約 7 倍で搬送された。このことより、空気の漏れによる流速の低下は搬送にかかる時間に大きく影響していることが分かり、空気搬送装置

において気密性を保つ必要がある。また、ビームダウン式太陽集光装置で、空気搬送による粒子持ち上げ装置を使用する際には、スペースの関係からボールバルブを取り付けることは難しい。そのため、スクリューフイーダ、またはスクリューフイーダと管路の間に気密性を保持できるような工夫・改良が必要である。

## 4. 結論

熱交換後の蓄熱粒子をレシーバまで持ち上げる装置として、複数の持ち上げ方法を検討し、空気搬送による蓄熱粒子持ち上げ実験装置を設計・製作した。製作した装置に密度、粒径の異なる 3 種類の粒子を用いて搬送実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 粒子を持ち上げる管路を垂直に立てた空気搬送装置では、投入されたアルミナ球 3 mm と 5 mm を持ち上げることができたが、5 mm ステンレス球は投入された粒子の半分も持ち上げられず、連続的に搬送ができなかったことがわかった。
- (2) バルブで気密性を保った管路を 45°傾け、加速距離の延長を行い、持ち上げ装置の改良を行った。改良後の装置では、5 mm ステンレス球の搬送にかかる時間を短くし、粒子排出量増加させることができた。
- (3) スクリューフィーダを取り付けた斜め管路では空気の漏れが生じ、管内に投入されたステンレス球をすべて持ち上げることができず、気密性を保持するようなスクリューフイーダの開発が必要であることが明らかになった。また、1.5 m 以上の位置へ粒子を搬送するためには、他の粒子の持ち上げ方法を検討する必要がある。

## 謝辞

実験を進めるにあたり、技術職員の三宅琢磨氏、濱畑貴之氏、長友敏氏の協力を得た。記して謝意を表す。また、本研究は JSPS 科研費 JP22K05007 の助成を受けたものである。

## 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 一第 1 章 再生可能エネルギーの役割一, (2014), p.4.~p.10
- 2) 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 一第 5 章 太陽熱発電・太陽熱利用, (2014), p.4.~p.10, p.39.~p.40
- 3) Evan Johnson, Derek Baker, Ilker Tari "Proposal of a Novel Gravity-Fed, Particle-Filled Solar Receiver" SolarPACES 2016 AIP Conf. Proc. 1850, p.030028-1~030028-7
- 4) 演習流体力学 日本機械学会 丸善出版 2012.5 JSME テキストシリーズ 日本機械学会, p.113