

太陽シミュレータを用いた太陽熱レシーバの開発 (レシーバ模型による検討)

原川 剛志^{a)}・長瀬 慶紀^{b)}・友松 重樹^{c)}・河村 隆介^{d)}

Development of Solar Thermal Receiver using Solar Simulator (Study by Model of Solar Thermal Receiver)

Tsuyoshi HARAKAWA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU,
Ryusuke KAWAMURA

Abstract

The solar thermal power generation is one of the renewable energy that has lately attracted considerable attention. There are troughs, Fresnel, parabola dish and tower in the solar thermal power generator. Each generator has receiver that converts the received sunlight into the thermal energy, and it influences the efficiency of the solar thermal power generator. It is thought for the improvement of the receiver, which the reflected light is hard to go out from the aperture of receiver, is good. Several types of receivers are designed by the ray tracing method, and estimated the efficiency by the experiments. The solar simulator simulates the optical path of the beam-down solar concentrator. The experiments, which heat the receivers by light from Xenon bulb and measure the temperature of receivers, were carried out with the solar simulator. The results by the ray tracing method showed the same tendency as ones of experiments. As the result, it is confirmed to be able to design the shape of receiver by using of the ray tracing method.

KeyWords: Solar simulator, Solar concentrator, Receiver, Ray tracing, Aperture

1. はじめに

現在、世界的に見て発電量の大部分を占める火力・原子力発電には問題が多く、今後発電量を増やすことは困難である。そのため、火力・原子力発電に代わる発電方法の必要性が高まっており、再生可能エネルギーによる発電に注目が集まっている。再生可能エネルギーの1つである太陽熱発電では鏡を用いて集光した太陽光をレシーバと呼ばれる集熱器に当てて熱に変換して利用している。よって、太陽熱発電の発電効率を上げるためにはレシーバの高性能化が必要である。レシーバに関して、図1に示すような、平成24年8月に宮崎大学に建設されたビームダウン式タワー型においては、キャビティ形状のレシーバが一般的である。本研究においてはキャビティ形状のレシーバからの熱損失の原因として反射光が開口部から逃げることによる損失が大きいと考え、レイトレーシング法を用いてレシーバ内に入射した光が反射によって外へ逃げにくいレシーバ形状の選定を行うこととした。選定したレシーバ形状については実験を行って比較を行う必要があるが、実際の太陽光集光装置は屋外にあり対流などの影響を受けや

すく、集光した光のエネルギーはその時の直達日射量に影響されるため、実験条件を揃えることは難しい。よって、実験条件が安定した状態でのレシーバ比較を行えるシミュレータを製作することが非常に重要である。そのため、本年度の研究目的はビームダウン式太陽集光装置と同様の光路を再現可能な太陽シミュレータの製作、及び製作した太陽シミュレータを用いて加熱したレシーバの温度分布及び時間ごとの温度変化の計測を行い、光の逃げにくいレシーバ形状の評価とレイトレーシング法の有効性の確認を行うことである。

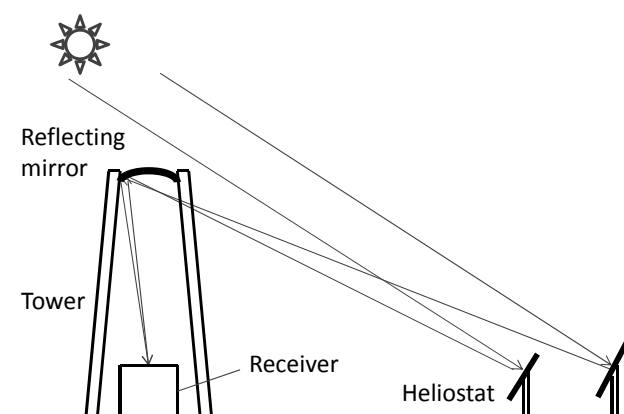


Fig.1 Beam-down solar concentrator.¹⁾

a) 機械システム工学専攻大学院生

b) 機械設計システム工学科准教授

c) 機械設計システム工学科助教

d) 機械設計システム工学科准教授

2. 太陽シミュレータ

2.1 太陽シミュレータについて

図2に太陽シミュレータ概略図を示す。太陽シミュレータはビームダウン式タワー型太陽集光装置と同様な光路を再現できるように光学系を構築し、光を受けて熱に変換するレシーバの固定位置を調整できるように、トラバース機構を備えている。また、シミュレータのやぐら部分は高強度、かつ軽量なアルミフレームで構成されている。

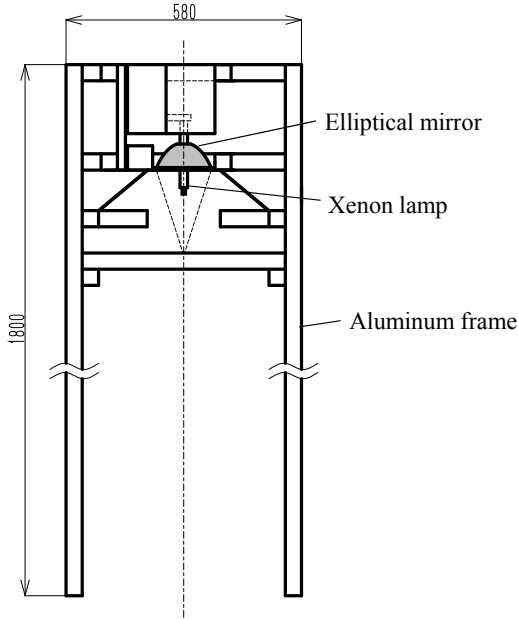


Fig.2 Solar simulator.

2.2 光源

(1) キセノンランプ

太陽光とは約 $0.300\sim 4000\mu\text{m}$ の広波長域に連続したスペクトルをもつ光である。キセノンランプは可視波長領域において太陽光と近似した連続スペクトルの光を照射することが可能である²⁾。太陽シミュレータでは鏡によって光を集光して利用するため、光源は集光を容易にするために点光源であることが求められる。そのため、光源にはキセノンランプの中でも電極間距離が 3.0mm と短いため、点光源として扱うことのできる定格 500W のキセノンショートアークランプを用いている。

(2) 点灯装置

キセノンランプは電気入力の変化に対して分光分布の変化が一定であるため、出力を一定にさせるために点灯装置はリップルやドリフトが発生しにくいものとなっている。また、キセノンランプはアーク放電によって光を発生させているため、キセノンランプ点灯にはキセノンランプの電極間に絶縁破壊を発生させた後、グロー放電を経てアーク放電へと移行してから状態を維持する必要がある。そのため、点灯装置には主要な機能を担う回路としてスタータと安定器がある。スタータは電極間の絶縁破壊のときのみ作動し、絶縁破壊後に安定器によって電流を調節す

ることでアーク放電を維持している。

2.3 光学系

光学系を図3に示す。シミュレータではキセノンランプから照射される光を集光するために楕円鏡を使用している。楕円鏡の焦点には第1焦点と第2焦点があり、一方の焦点を通過した光が楕円鏡で反射された場合、もう一方の焦点を通過する特性がある。また、鏡面は分光反射率が平均的に高いアルミ³⁾が蒸着されているため、波長域の広いキセノンランプの光もほぼ均一に反射することができる。光源として使用しているキセノンショートアークランプは点光源として扱うことができるため、図3のように楕円鏡の第1焦点の位置に光源が重なるようにキセノンランプを設置することにより、キセノンランプから照射された光が楕円鏡で反射されると第2焦点に集光される。

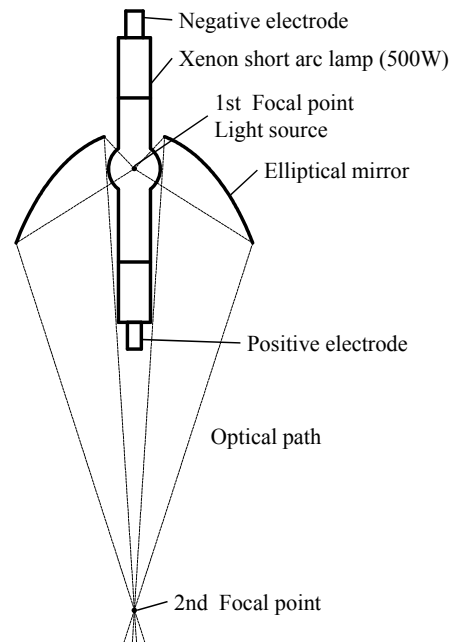


Fig.3 Optical system of solar simulator.

2.4 冷却装置

キセノンランプは破損を防ぐため、口金表面部分の温度を 200°C 以下に保ち続ける必要があるとされている。キセノンランプの点灯時には抵抗熱によって口金部分の温度が上がることから、口金部分の冷却を行う必要がある。冷却方法として、キセノンランプの定格が 10kW までのものは強制空冷、定格が 10kW を超えるものに関しては水冷が用いられている。太陽シミュレータで使用しているキセノンランプは定格が 500W であるため、太陽シミュレータにおいては3機のファンによって強制空冷を行っている。ファンの設置箇所は図4に示すように、キセノンランプの陰極側に1機、陽極側にキセノンランプの光路の妨げにならない箇所へ2機を設置している。また、陰極側には効率よく口金を冷却ができるようにカバーを設置して風の流れる方向を限定しており、陽極側はそのままの状態では口金部分に風が当たりにくいいためステンレスプレートを用

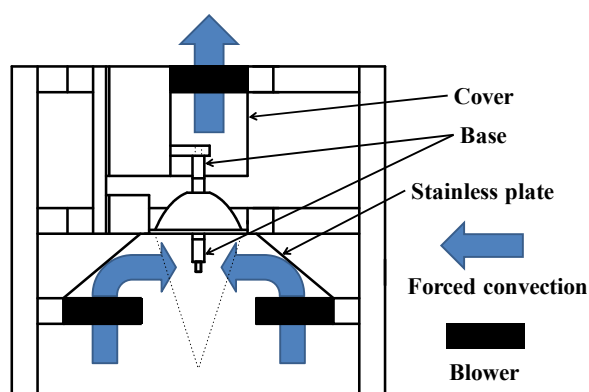


Fig.4 Cooling system.

いて流れの向きを調整している。

2.5 安全対策

太陽集光シミュレータは底面積に比べて全長が長く、重心もシミュレータ上部に存在するため、転倒する危険性がある。また、光源として使用しているキセノンランプは太陽光と近似した波長であるため、太陽光と同様に人体への悪影響が存在する。そこで、太陽集光シミュレータに安全対策を施すこととした。

(1) カバー

キセノンランプから放射される光は高輝度かつ人体に有害である紫外線が含まれている。よって、キセノンランプから放射される光を直視または直接光を浴び続けることは危険である。そのため、シミュレータ外部に光が漏れるのを防ぐためにシミュレータの側面にカバーの取り付けを行った。また、カバーの材料は可視光及び紫外線を透過せず、材料の準備と加工の容易なベニヤ板とした。

(2) 転倒防止対策

太陽集光シミュレータが転倒することを防ぐために、JIS で規格された転倒角を満たすこととした。そのためにはシミュレータの底面積を増やす必要があったため、シミュレータの足にベニヤ板で製作したシミュレータ固定用の板を締結した。また、シミュレータ上部と天井をひもで繋ぐことでさらに転倒をしにくいようにした。

3. 実験装置

3.1 レシーバの設計

レシーバとは太陽熱利用において太陽光を受けて光エネルギーを熱エネルギーに変換する集熱器のことである。本研究において、レシーバの形状はビームダウン式タワー型太陽熱発電装置で一般的に使用されるキャビティ形状であることを前提とし、反射光が開口部から逃げにくい形状とするため、以下に示すレイトレーシング法を用いてレシーバ形状の選定を行った。また、比較を行うために受熱面積となるレシーバの表面積は全て統一して行った。

3.2 レイトレーシング法

レイトレーシングについての例を図5に示す。本研究に

おいてレイトレーシング法は光源からの光について光線追跡を行うことで、楕円鏡で集光された光がレシーバに入射した後の光路の予測方法として用いている。また、本来レイトレーシングは360°の全方向に対して行う必要があるが、今回考案したレシーバ形状が光軸を中心とした回転体であるため、どの方向から見ても同じ形状である。そのため、どの方向においても結果は同じとなると考えてレイトレーシングは1方向からのみ行った。

今回のレイトレーシングを行う際の条件として

1. 反射は全て正反射である
2. 楕円鏡での反射光は全て焦点を通過する
3. エネルギーの強度分布は一律とする
4. レシーバに入射した光のエネルギーを100%とし、5%以下になるまで吸収される、もしくは開口部から光が逃げるまで光線追跡を行う

としており、光のエネルギーはレシーバに使用した材料のブリキの吸収率0.6を用いて吸収量を決定し、光線追跡は光学系の図面から、レシーバへの入射角が一番大きい光線、入射角が一番小さい光線、2本の中間の光線の3本について行った。レイトレーシングの結果から効率の高かった以下の図6に示すレシーバを製作することとした。また、図

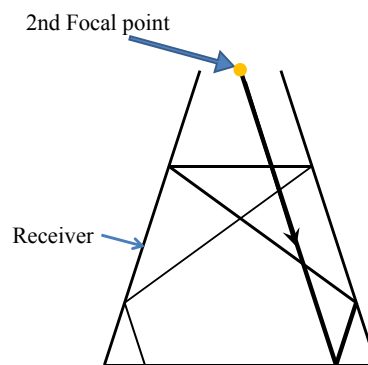


Fig.5 Example of ray tracing.

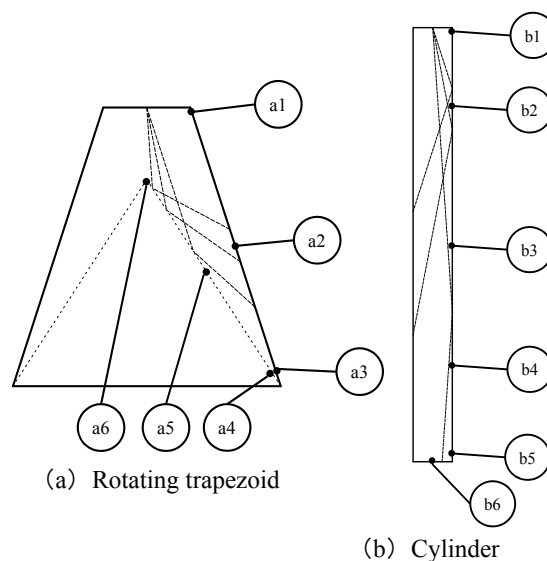


Fig.6 Position of thermocouple.

中の番号 a1～a6 および b1～b6 は次の実験の際に熱電対を取り付けた位置を表しており、図中の点線はレイトレーシングによって予測した光路を示している。

3.3 温度分布計測装置

以下に温度分布計測に用いたサーモグラフィ及び時間ごとの温度変化を求めるために使用した熱電対について示す。

3.4 サーモグラフィ

温度分布計測に使用したサーモグラフィの諸元を表 1 に示す。赤外線とは波長領域が 0.75～1000 μm の電磁波のことをいう。赤外線は 0K 以上の全ての物質から放射されており、温度に応じてその放射量は変化する。同じ温度においても放射量が異なることがあり、その原因として放射率 ϵ が存在する。全ての温度において最大の放射を行う物質を黒体と呼び、この黒体の放射率を 1 とする。よって放射率は $0 < \epsilon < 1$ となる。また、黒体の放射については次のステファン-ボルツマンの式(1)が成り立つ。

$$W = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \times T^4 = \sigma T^4 \quad (1)$$

ただし、

W : 単位面積あたりの放射量 [W/m^2]

h : プランク定数= 6.6261×10^{-34} [$\text{W} \cdot \text{s}^2$]

T : 絶対温度[K]

c : 光速= 2.9979×10^8 [m/s]

k : ボルツマン定数= 1.3807×10^{-23} [$\text{W} \cdot \text{s}/\text{K}$]

σ : ステファン-ボルツマン定数= 5.6705×10^{-8} [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$] とする。

ステファン-ボルツマンの式は黒体の全放射量を算出したもので、単位面積あたりの全波長における放射量を示し、通常の物体からの放射においては放射率 $\epsilon < 1$ をかけることでその放射量を求めることができる。式(1)より黒体の放射量は温度の 4 乗に比例することが分かり、赤外線の放射量とその放射率が分れば温度を逆算することができる。サーモグラフィは赤外センサによって物体から放射される赤外線量を計測しているため、サーモグラフィに計測対象の物質の放射率を設定することで、算出された温度分布がサーモグラフィ画像上に表示される。

Table.1 Specification of thermography.

Infrared sensor	pixel:160×120,pitch:35 μm
Temperature measuring range	-20～250 $^{\circ}\text{C}$
Temperature accuracy	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ or $\pm 2\%$
Emissivity correction	0.01～1.00 (pitch:0.01)

3.5 熱電対

サーモグラフィは温度算出のために放射率を設定する必要がある。しかし、放射率は表面状態によって異なるため正確な放射率を設定することは難しく、サーモグラフィで計測した温度は正確であるとは言えない。また、今回使用したサーモグラフィでは動画の撮影ができず、断続的な画像による温度分布の計測しかできない。そのため、サーモグラフィでの計測と同時に、局所的ではあるが連続的に精度よく温度を計測の可能な熱電対を用いてレーザーの数箇所での温度計測を行い、サーモグラフィで計測した温度分布と合わせてレーザーの評価をすることとした。今回の実験では K 型の熱電対として JIS で規格化されているアルメル-クロメル熱電対を使用し、温度の計測、記録にはデータロガーを使用した。

4. 実験及び結果の考察

4.1 実験方法

計測装置を図 7 に示す。図 7 において下図は上図を 90 $^{\circ}$ 回転させた図である。太陽シミュレータにおいて加熱したレーザーの温度分布をサーモグラフィ、温度を熱電対によって計測した。以下に実験方法について示す。

4.2 実験準備

(1) 丸穴付き遮光板の製作・取付け

各レーザーへ入射する光量を同じにするため、キセノンランプとレーザーとの間に $\phi 10$ の穴をあけた遮光板を製作し、シミュレータに取り付けた。高さに関しては、遮光板の厚みとスペーサの厚みを考慮してレーザーの開口部が焦点距離となるように位置の調整を行った。

(2) レーザー位置調整

レーザー側面に $\phi 2$ の真鍮丸棒を銀ロウ付けし、小型万力を使用してアルミフレームに固定を行った。レーザーの位置決めは遮光板の穴とレーザー開口部の穴が垂直に重なるように $\phi 9.5$ の丸棒と L ブロックで中心あわせを行い、シックネスゲージ等を使用してクリアランスを 0.3mm 以上 0.5mm 以下に合わせて位置決めを行った。

4.3 温度分布及び温度の計測方法

(1) 温度分布計測

サーモグラフィを用いた温度分布の計測はサーモグラフィをレーザーと同じ高さの位置に調整し、レーザー点灯開始からストップウォッチで時間を確認し、15s 間隔ごとに撮影を行った。また、レーザーの位置固定のために取り付けた $\phi 2$ の真鍮丸棒と温度計測のために取り付けた熱電対から熱が逃げて温度分布に影響を与える可能性があったため、レーザーを 3 方向から撮影して温度分布に異常がないか確認したところ、どの方向から撮影した画像も温度分布はほとんど変わらなかった。そのため、真鍮丸棒と熱電対からの熱の逃げは無視できるものとして計測を行っ

た。

(2) 温度計測

熱電対での温度計測はデータロガーでサンプリング間隔を 500ms として、キセノンランプの点灯を目視によって確認すると同時に手でデータロガーでの記録を開始し、記録を行った。温度計測は再現性を確認するために各レシーバで 3 回ずつ行っており、1 回目の計測でデータロガー上での温度変化が見られなくなつてから数分経過するまで計測し、1 回目の計測後にデータロガーの記録を確認して定常状態となるまでの時間を参考に、データロガーのトリガを設定することで 2 回目、3 回目での計測では定常状態になるまでの間のみ計測を行った。また、3 回目の計測の際には位置調整の妥当性を確認するため、一度レシーバを取り外した後に再度取り付けを行ってから計測を行った。このときの底面円錐型円錐での温度計測結果の一例を図に示す。図より、1~3 回目の計測結果に大きな誤差は見られず、他のレシーバでも同様の結果が得られたため、温度計測の再現性と位置調整の妥当性が確認できた。

4.4 太陽シミュレータでの実験結果及び考察

図 9 にサーモグラフィでの温度分布計測結果、図 10 に (a) の底面の温度分布計測結果、図 11 に太陽シミュレータでの温度計測実験の結果について示す。また、文中の (a)、(b) は図 6 に示すレシーバ形状のことであり、図 11 の凡例は図中の a1~a6, b1~b6 に対応している。

(1) レイトレーシング法について

図 6、9、10 より、レシーバの最高温度となる箇所とレイトレーシングによる予測光路で最初にレシーバに光が当たる箇所には相関が見られる。さらに、レイトレーシングで予測した 3 本の光路の間隔が狭いほど温度が高くなるのがわかる。以上のことからレイトレーシングで求めた光路から定性的な温度分布の予測ができると考えられる。

(2) 温度分布計測について

図 6、9、11 より、サーモグラフィで計測した温度分布については、熱電対での温度計測の結果との相関がみられるのがわかる。よって、レシーバの外側に塗装した耐熱塗料により、レシーバの放射率が均一な状態でサーモグラフィによる温度分布計測が行えた。

図 10 から (a) の底面の温度分布は同心円状に広がっているのがわかる。(a) の内側の円錐はレシーバに入射してから最初に当たる箇所であることから、光の強度分布も同心円状であると言える。

(3) 温度計測について

図 11 に示す熱電対での温度計測結果から、(a) の内側と外側の円錐下部における温度の上がり方が他の計測箇所と異なるのがわかる。原因として、他の計測箇所は温度の上昇が計測開始時点で始まっているのに対し、(a) の内側と外側の円錐下部での温度の上昇は数秒後に始ま

っており、レシーバ形状の選定でレイトレーシングを行った際、(a) の内側と外側の円錐下部は直接当たる光がほとんど無く、光のエネルギーを受けにくい箇所であったことから、他の計測箇所は直接光が当たることで温度が上昇しているが、(a) の内側と外側の円錐下部はほとんど熱伝導によって温度が上昇していると考えられる。

図 11 において (a) と (b) とを比較すると温度に明らかな差が見られる。今回製作したレシーバは、レイトレーシングによって光を逃がしにくい形状として選定を行ったものであり、どちらのレシーバも光の持つエネルギーをほぼ吸収していると考えられる。よって、温度に差がで

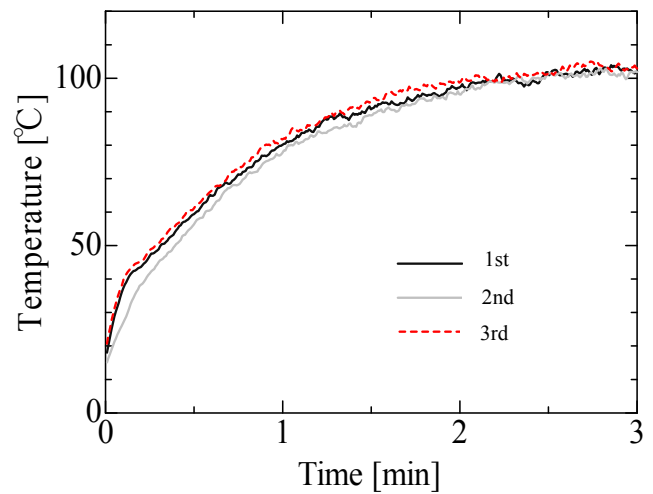


Fig.7 Confirmation of reproducibility.

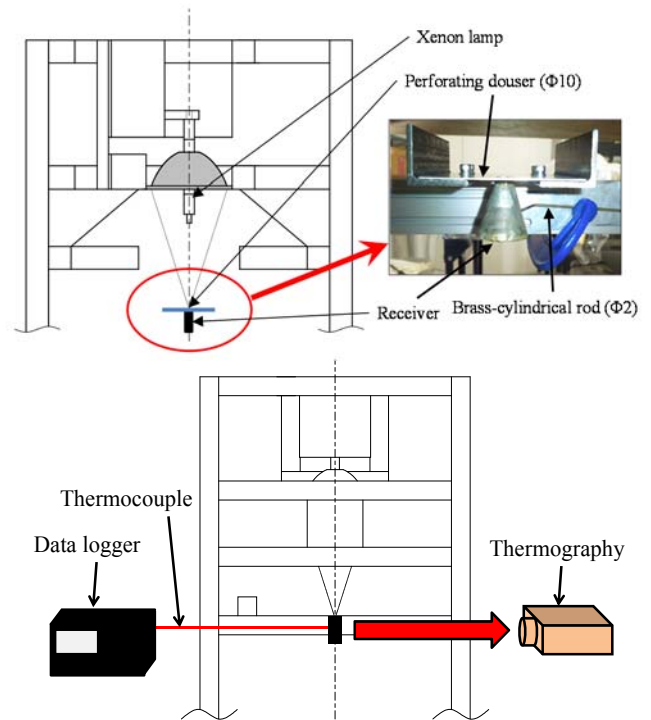


Fig.8 Measurement system.

るのはレシーバ内で反射した光から得られるエネルギーが少なく、対流などによる損失が大きいためであると言える。つまり、レシーバ内で反射した光がレシーバの温度分布に与える影響は小さく、直接光による影響の方が大きいことが言える。

5. 結論

ビームダウン式タワー型太陽集光装置を想定した太陽シミュレータで行ったレシーバの温度分布及び時間ごとの温度変化の計測結果から以下の結論を得た。

1. ビームダウン式タワー型太陽集光装置を想定した太陽シミュレータを設計・製作することができた。また、太陽シミュレータを用いてレシーバを同心円状の強度分布を持つ集光光によって加熱することができた。

2. 熱電対での温度計測結果から、レイトレーシングで求めた光路からレシーバが高温となる箇所の予測ができた。よって、レイトレーシング法をレシーバ形状選定に利用できることが確認できた。
3. レシーバ内の温度分布は直接光による影響が大きいことがわかった。しかし、今回の実験で得た結果だけではレシーバの評価をすることはできなかった。

参考文献

- 1) 玉浦裕, グリーンフューエル製造プロセスの開発成果 (1), 季報エネルギー総合工学, 27巻4号, 2004.
- 2) ウシオ電機株式会社, 光技術情報誌「ライトエッジ」, No.27.
- 3) 国立天文台, 理科年表, p.518, 1997.

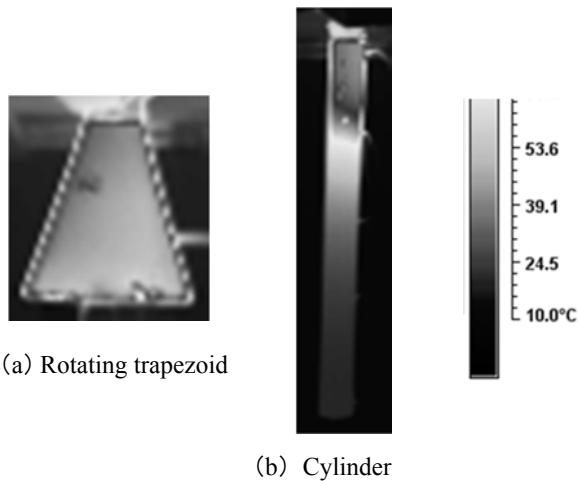


Fig.9 Temperature distribution.



Fig.10 Temperature distribution of bottom face.

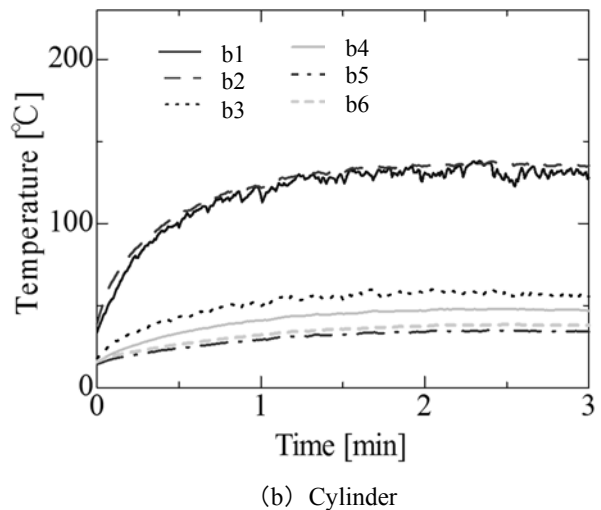
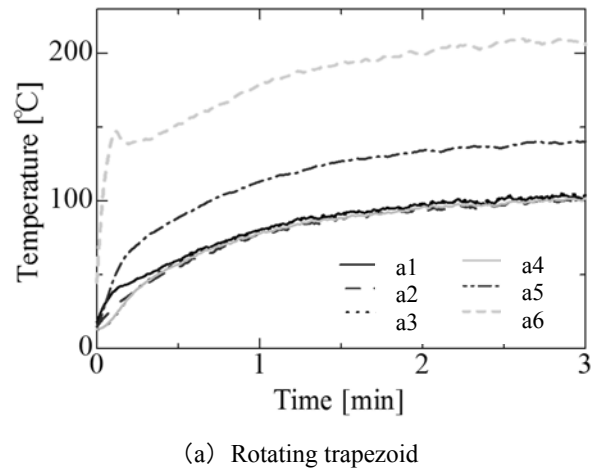


Fig.11 Temperature change.