

Experimental investigation of a wall-mounted solar collector with a concentration mirror

Taichi SHIMOYAMA^{*1}Rion SAKAGUCHI^{*2}Atsushi AKISAWA^{*3‡}

集光ミラーを伴う壁面設置型太陽集熱器の集熱性能実験

霜山 太一^{*1}坂口 璃音^{*2}秋澤 淳^{*3‡}

Abstract

The objective of this study is to experimentally investigate the performance of a vertically mounted solar collector with a mirror concentrator. The concentrator was designed to combine a parabolic mirror with an involute shaped mirror. An evacuated glass tube was used for the solar thermal collector. The size of the device is 1500mm in length, 100mm in depth and 360mm in height. The concentrator was built with an aluminum mirror of which reflectance is 95%. An identical evacuated glass tube collector without the concentrator was set parallel to the proposed device as a reference in order to compare the performance under the same solar irradiance conditions. The experiments were carried out in 10 days between November in 2021 and February in 2022 except for December. The results indicate that the amount of collected heat by the proposed device is larger than the collector without concentrator by the factor of 2.2 to 5.2, 3.0 in average. The heat collection efficiency is defined as the ratio of recovered heat to the solar irradiance captured in the vertical front aperture of the concentrator. The efficiency was estimated to be approximately 0.6 to 0.8.

Keywords: Solar thermal, Concentrator, Wall-mounted, Evacuated glass tube solar collector, Experiment

キーワード：太陽熱，集光器，壁面設置，真空管型太陽集熱器，実験

1. はじめに

太陽熱の集熱には平板型集熱器あるいは真空管型集熱器が一般的に用いられている。通常は屋根に設置されるが、ベランダの手すり部分に垂直に設置されるケース¹⁾もある。平板型集熱器を垂直に設置すると、太陽の日射が斜めに入射するため、屋根設置に比べて受け取るエネルギーが減少する。その結果エネルギー密度が低下するため、温水の温度が上がりにくい。そこで、集光ミラーを取りつけることによって受光部に入射する日射量を増強することが有効となる。大型の太陽集熱器にはトラフ型放物面鏡²⁾やリニアフレネルミラー型集光系が応用される³⁾が、太陽を1軸追尾し、常に太陽光を受光部に受けるようにミラーの角度を制御する機構が必要となる。複雑な機構は住宅用には

向かないことから、非追尾で集光できることが望ましい。

既存技術として、二つの放物面型ミラーを組み合わせ、一定の許容入射角度を持たせたCPC(複合放物面鏡, Compound Parabolic Concentrator)と呼ばれる集光系³⁾がある。太陽が許容入射角度の範囲内にあれば追尾機構なしで日射を集められる。言い換えれば、昼間の太陽の移動をある範囲で捕捉できる。フレネルレンズに許容入射半角を持たせる設計手法⁴⁾も提案されている。

他方、住宅用太陽光発電(PV)の設置義務化など、PVの普及が推進されている結果、屋根がPVパネルで占められる傾向が予想される。一般的な住宅用の3kWのPVパネルは20m²程度である一方、一世帯の給湯負荷を賄う集熱パネル面積は6m²程度である。すなわち、太陽集熱器の面積はPVパネルに比べて小面積ですむので、建物の壁面に設置する形態にも可能性がある。ドイツには高層の集合住宅

*1 Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

*2 Department of Applied Physics and Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

*3 Professor, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo
‡e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

Revised: July 31 2024, Accepted: October 26 2024

*1 元東京農工大学工学部機械システム工学科

*2 元東京農工大学工学部化学物理工学科

*3 東京農工大学大学院工学研究院教授

(〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

‡e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

(原稿受付: 2024年7月31日, 受理日: 2024年10月26日)

の壁面に平板型集熱器を設置した事例⁵⁾もある。垂直設置の観点では、両面で集熱する平板型集熱器を東西方向あるいは南北方向に垂直に設置する方式について、Radwanらが数値シミュレーションによって評価した研究がある⁶⁾。Shahらは真空管式集熱管を平面状に垂直に並べた集熱器に関し、配置方位による集熱性能を予測した⁷⁾。

集光系を壁面に設置する観点から、Mallickらは非対称なCPCミラーを用いて垂直面に配置した受光部に集光する方式を提案した⁸⁾。上部の放物面鏡よりも下部の放物面鏡が外側に張り出すミラー形状をしている。Gómezらは水平な受光部に傾斜させた平面ミラーを組み合わせた建物壁面一体型の太陽光発電を評価した⁹⁾。一方、Akisawarらは放物面鏡を用いて水平な平板の受光部に集光する方式¹⁰⁾を提案した。東西方向に集熱パイプを配置する形態であり、CPCと異なり放物面鏡は一つであるが、季節間の太陽の移動をとらえる設計となっている。それに対しMboupらは放物面にインボリュート形状を組み合わせる改善手法とともに円管状の集熱部を用いることを提案し、光線追跡シミュレーションによって最適なミラー形状を導いた¹¹⁾。Yiらは、真空管式集熱管のガラス部(外円筒)と受光部(内円筒)の間の隙間を通過する日射を逃さず集光する集熱管下部のミラー形状を提案している¹²⁾。本研究ではMboupらが設計した集光系に注目する。高温集光に適した真空ガラス管型集熱器を想定した設計であり、垂直に固定されながら冬季の集光集熱に向けて集光性能が最適化されている。壁面設置を想定し集光系の奥行きが小型であり実用性が考慮されている。ただし、Yiらのような隙間の対策はなされていない。

真空管式集熱器を集光ミラーで置き換えることは、コストが高い集熱器本体の数を減らせるので、太陽集熱のコストを抑え普及を促す効果が期待できる。2050年のカーボンニュートラル目標を達成するには電力のみならず熱の脱炭素化が不可欠である。比較的低温の熱負荷である住宅の給湯・暖房に太陽熱利用を促進することは重要である。本研究で用いる集熱器では、集光することにより受光部での熱流束が高まるので、高温の熱を回収することも可能と考えられる。

本研究ではMboupらが設計した集光系を実装した太陽集熱器を製作し、実際の日射の下で集熱性能を実験的に実証することを目的とした。集光系がない真空ガラス管型集熱器の実験と比較することにより、太陽集熱の観点から本集光系の効果を検証する。

2. 集光ミラーを伴う壁面設置型太陽集熱器の設計

2.1 太陽集光ミラーの形状

太陽光を集光する放物面鏡は、真正面から入射する光を焦点に集める働きをする。本研究で用いた集光系の形状を図1に示す。ミラーの上部は傾いた放物線であり、下部はインボリュート曲線形状をしており、両者は滑らかに接続されている。集熱器を壁面に設置することを想定し、この

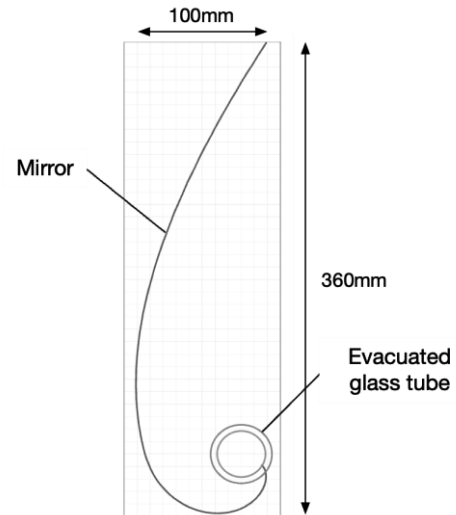


Fig. 1 Cross-sectional view of the concentrator consisting of a parabola and an involute curve.

Table 1 Concentrator settings

Item	Unit	Value
Focal distance of parabola	mm	95
Rotation angle of parabola	degree	25
Rotation angle of involute	degree	-30
Radius of involute	mm	18.2
Depth of concentrator	mm	100
Height of concentrator	mm	360
Diameter of evacuated tube	mm	47

集光系はある一定の奥行き範囲に収めるものとし、集熱器の奥行きを100mmと設定した。受光部としてはインボリュート曲線を設計する基礎円の中心の位置に真空管型集熱器が設置される。図1は設計で得られた基礎円から出発するインボリュート曲線・放物線を組み合わせたミラーの形状を図示したものであるが、実際のミラーは真空ガラス管の外側部分となる。ミラーの接点においては受光面とミラーの間に真空ガラス管の厚み部分だけ隙間ができる。

本集光系の設計法の概要は以下の通りである¹¹⁾。

- ① 水平方向に軸を持つ放物線を反時計回りに傾ける。インボリュート曲線を反時計回りに回転させる。
- ② 放物線の傾き(微係数)とインボリュート曲線の傾きが一致する点を求める。
- ③ 放物線とインボリュート曲線をその点で滑らかに接続する。
- ④ インボリュート曲線の基礎円の半径を調整し、所定の奥行きに合わせる。

2.2 設計条件および設計値

本集熱器は壁面に垂直に固定され、太陽を追尾しない。非追尾で集光・集熱する方式である。この時、建物の熱負

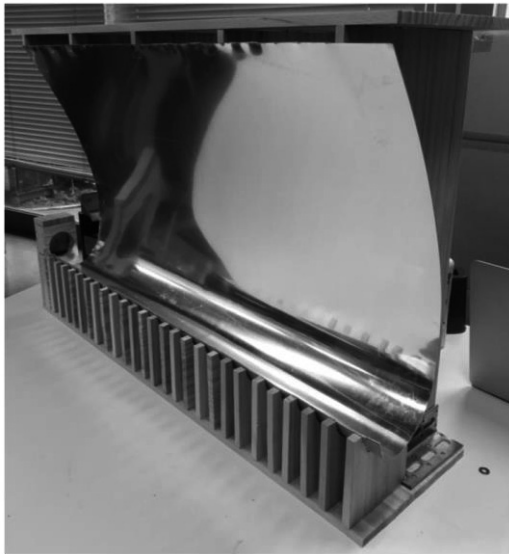


Fig. 2 Photo of the concentration mirror.

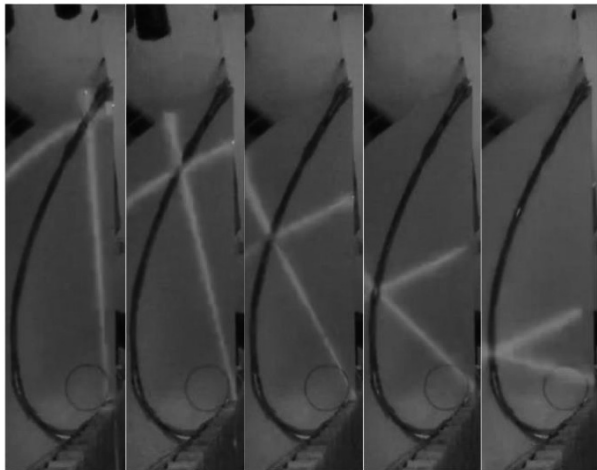


Fig. 3 Reflection performance of the concentrator.

荷（給湯・暖房）は冬季に増加することから、冬季（11月～2月）における積算集光量を最大化する設計となっている。設置地点は東京、壁面は南向きを仮定した。放物線の回転角、インボリュート曲線の回転角を設計変数とし、TracePro を用いた光線追跡シミュレーションによって集光量を計算する。Mboup らによる設計の結果、表 1 に示す設計値が与えられた。本研究ではこの設計結果を実験装置として製作した。集光系の高さは真空管外径の 7.7 倍である。

3. 太陽集熱実験装置

3.1 集光ミラーの製作

受光部となる真空管式集熱器は既製品を使用した。真空ガラス管の長さは 1,500mm である。集光ミラーの横幅をそれに合わせた。集光ミラーの形状を保持するために木製の板でリブを作成し、そこに厚さ 0.5mm、反射率 95% のアルミ板を接着した。製作した集光ミラーの写真を図 2 に示し

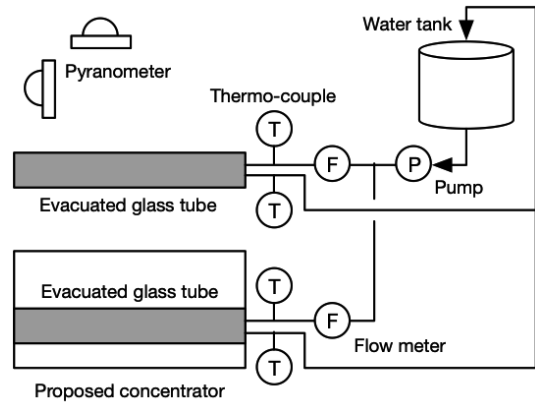


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup.

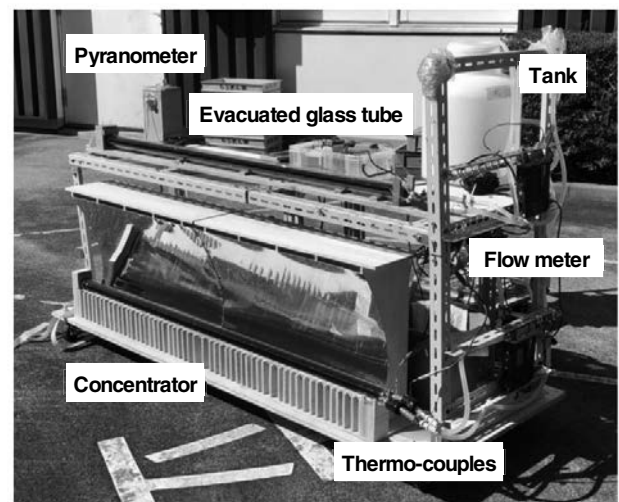


Fig. 5 Manufactured experimental setup.

た。

3.2 集光系の確認

製作した放物面ミラーが集光できることを調べるため、レーザー光を当てて目視にて簡易的に確認した。集光系の内側にポリプロピレンのシートを設置し、レーザー光を可視化した。実験の一例を図 3 に示す。シートに描かれた円が集熱管表面の位置を示している。レーザー光の入射位置が変化しても光線は受光部である集熱管に当たっている様子が見て取れる。なお、集光系の設計においてはガラス管が無視されているため、実際の集光性能はガラス管による反射や減衰の影響を受けるため低下すると予想される。Mboup らは本集光系が真南に向けて設置されているときの太陽位置と集光性能の関係を議論している¹⁴⁾。

3.3 太陽集熱実験装置の製作

集光ミラーに真空ガラス管集熱器を取り付け、集熱管に水を循環させることによって集熱量を計測する。今回の実験では集光系による受光部面積あたりの入射量の増加を測定することが目的である。集光系の効果を調べるために比較対象として通常の真空ガラス管のみの集熱器を並べて設置し、同時に集熱量を測定する設計とした。測定系を含めた実験装置の構成を図 4 に示す。

実際に製作した実験装置の写真を図 5 に示す。比較対象の真空ガラス管単体は集光系つきと干渉しないように、単体を上部に、集光系つきを下部に配置した。集光系に入射する日射は集光系前面の垂直面を通過するので、日射計（英弘精機、小型日射系 ML-01）を水平面と垂直面に取り付けて日射量を計測した。流量計にはキーエンス製コリオリ流量センサ FD-S を使用した。真空ガラス管集熱器には寺田鉄工所製のソラリス CPC1506 の部材を用いた。

図 4 の通り集熱器から出た水はタンクに戻り、再び集熱器に送られて循環する。集熱器に入る水の温度は時間が経つにつれて上昇するため、非定常な実験となる。

図 5 の集光ミラー下部がインボリュート形状の部分となるが、濃い青の真空管内側の受光部が映っていることが見て取れる。したがって、インボリュート部に到達した光が受光部に届く様子が確認できる。

4. 集熱実験結果

4.1 実験条件

東京農工大学小金井キャンパス内において、建物を背面に実験装置を南向きに設置して実験を行った。建物の影がかかることから実験は 9時から 15時に行った。熱回収のための流量は約 10~12mL/s 程度に設定した。実験開始直後の 1 時間程度は初期の流量から増加が見られたが、その後は緩やかに増加傾向があるものの概ね安定していた。集光系つきと真空管のみのいずれの集熱器にも同じ流量の水を流した。データの測定間隔は 1 秒とした。測定は 2021 年 11 月~2022 年 2 月に行ったが、12 月は真空ガラス管が破損したため実験データを取得できなかった。

集熱量は集熱管入口と出口の温度差から次式によって算出した。

$$Q = \dot{m}c_w(T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

集熱効率は集光系の前面（コンボリュート状ミラー部下

端までの垂直面）に入射する 10 分間の垂直面日射量と当該 10 分間の集熱量 Q の比として次式で求めた。

$$\eta = \frac{Q}{IA} = \tau\alpha - \frac{U(T_m - T_a)}{I} \quad (2)$$

ただし、 T_m は次式で表される代表温度を意味する。

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (3)$$

4.2 実験結果

実験結果として 11 月と 1 月の実測例を示す。図 6(a) は 2021 年 11 月 13 日の日射量、図 6(b) は 2022 年 1 月 22 日の日射量の挙動を示す。図 7 は集光系の有無に対する集熱量の測定結果である。両日とも快晴であり 1 日を通して日射がよい条件であった。実験装置の位置で垂直面と水平面の日射量を計測した。11 月も 1 月も水平面に比べて垂直面の日射強度は 2 倍弱程度であった。11 月 13 日の太陽高度の最大値は 36.6°, 1 月 22 日は 34.9° である。太陽高度が低い冬季の場合には、垂直面で日射を集めることは優位性がある。

11 月 13 日の結果をみると、実験開始直後は集熱量にあまり差がないが、時間が経過した後の安定した集熱状況では真空管のみの場合に対し提案システムの集熱量は 3~5 倍程度大きいことがわかる。一方、1 月 22 日の結果では、その比率は 2~3 倍程度となった。この 2 つの結果をみると、垂直面日射量がほぼ同程度であるのに対し、集光系つきの集熱量が拡大している。集光系は直達光を集めるように設計されていることから、直達光が増えていることを示唆している。その影響を受けて真空管のみの集熱量も 11 月の結果に比べて顕著に増加したと考えられる。

本研究では 11 月に 5 日、1 月に 4 日、2 月に 1 日の集熱実験を行った。各日における集光系つきと真空管のみの集熱量の比較を図 8 に示す。なお、実験日の内、1 月 20 日、21 日、25 日を除き快晴であった。1 月 20 日は実験開始時間が 10 時と他に比べて遅かったため集熱量が少ない。真空管のみに比べた集光系つきの集熱量比は 2.2 倍~5.2 倍であり、

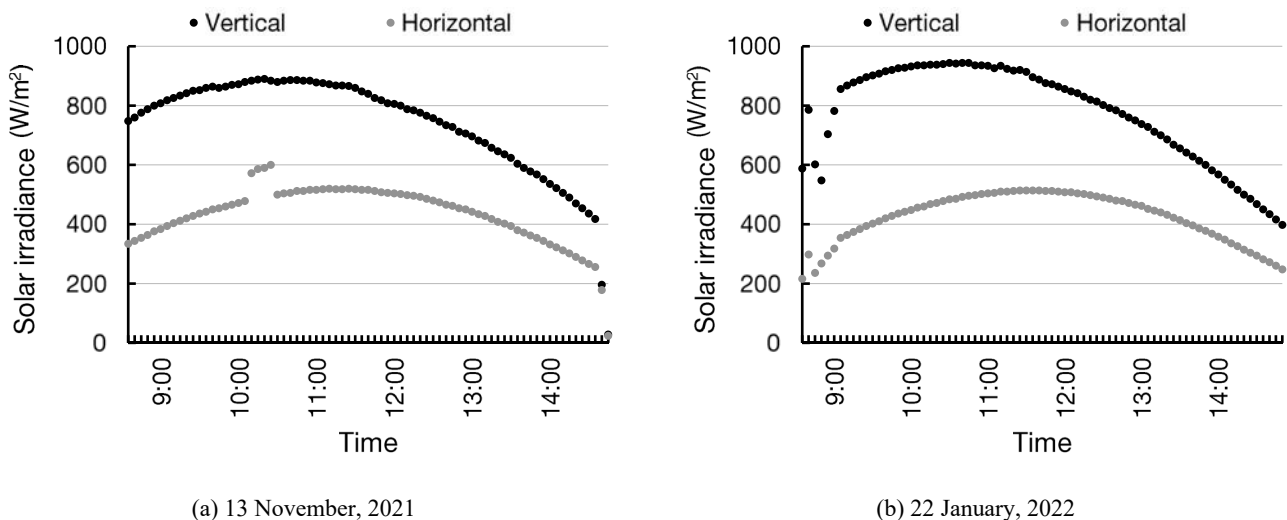


Fig. 6 Solar irradiance in vertical or horizontal plane.

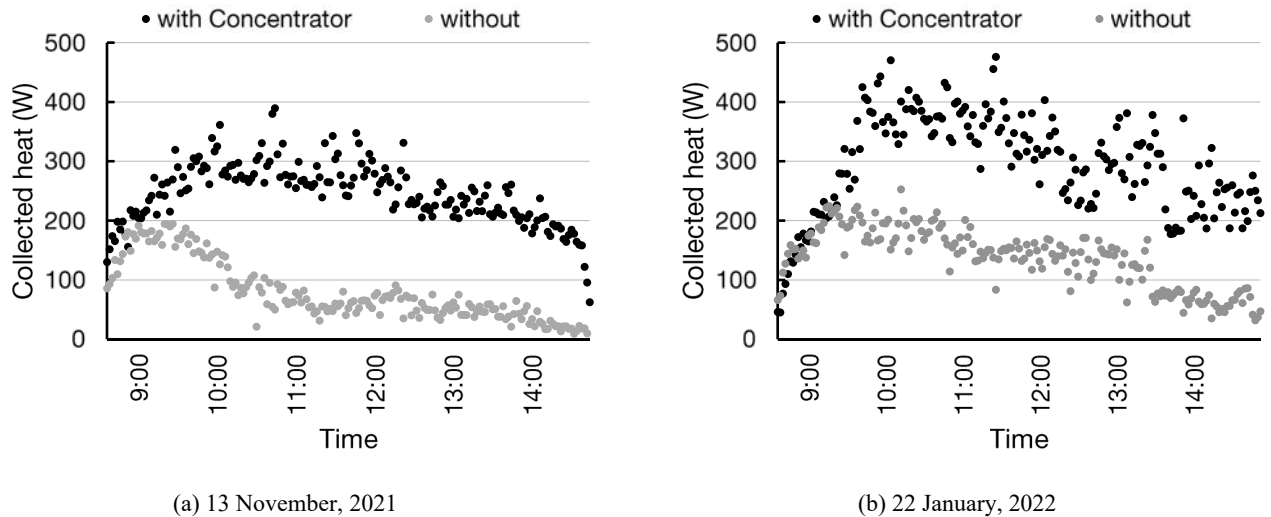


Fig. 7 Results of collected heat.

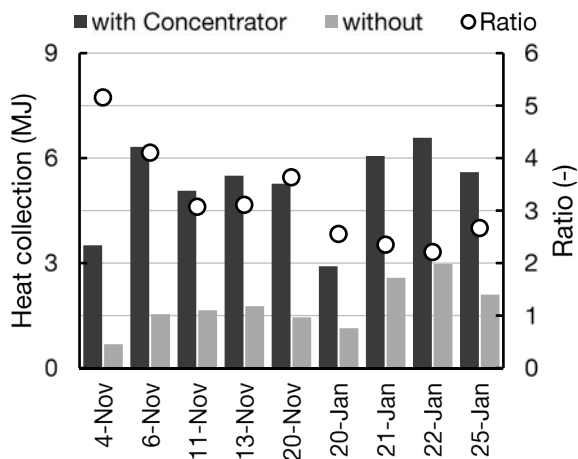


Fig. 8 Comparison of heat collection with/without the concentrator.

平均すると 3.0 倍となった。Mboup らのシミュレーションによる集光量の比較では 5 倍程度大きいと予想されていた。ただし、シミュレーションでは直達光のみを考慮し散乱光は含まれていない。真空管のみの場合は散乱光も入射すること、集熱管とミラーの隙間により集光の損失があることを考慮すると、集光量比 5 倍は過大評価と考えられる。

4.3 集熱効率

前述の通り集熱器で温められた水はタンクに戻り、再び集熱器に循環しているため、徐々に温度が上昇する。11月13日および1月22日の集熱器入口温度の時間変化を図9に示した。実験開始後から温度が上昇し、13:00あたりでピークとなる。それ以後はタンクから外気への放熱により温度が低下する。外気温は11月13日が12~18°C、1月22日は3~9°C程度であった。

実験開始後 1 時間程度は流量が安定していないこと、13:00以降は垂直面日射量が急速に低下することを踏まえ、実験が安定している時間帯として 10:00~13:00 を対象とし

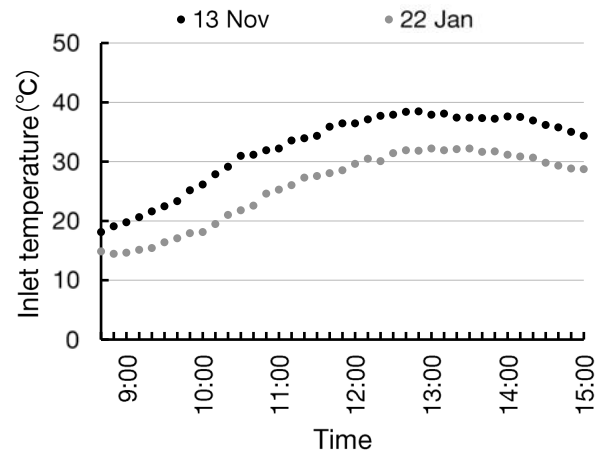


Fig. 9 Inlet temperature of the collector.

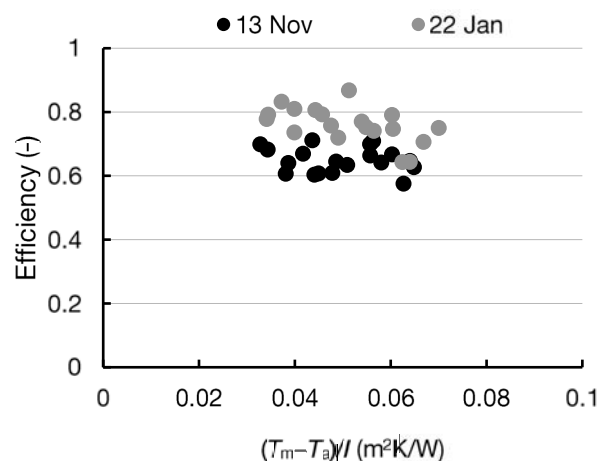


Fig. 10 Heat collection efficiency of the proposed concentrator.

た。11月13日および1月22日の実測データから10分間の平均値を用いて集熱効率を算出した結果を図10に示す。ただし、集熱器の代表温度は10分間の平均値を、外気温は気象庁による気象データ（東京都府中）¹³⁾から10分おきの値

を取った。その結果、提案した集熱器の効率は 0.6~0.8 程度に分布していることが示された。

集熱効率の式(2)によれば、代表温度と外気温との差が大きいくほど熱損失が増えるが、今回の結果には緩やかに右下がりの傾向が見て取れる。最小二乗法により一次関数を当てはめるところ次の推定値を得た。なお、後述する 12 月の真空ガラス管の破損により 11 月と 1 月では使用した集熱器が異なっている。その影響がある可能性を踏まえ、11 月 13 日と 1 月 22 日の違いをダミー変数として扱った。

$$\eta = 0.854 - 1.838 \frac{T_m - T_a}{I} - 0.113 \text{ Dummy} \quad (4)$$

ここで、Dummy は 1 月 22 日の場合には 0、11 月 13 日の場合には 1 をとる。相関係数は 0.802 と推定された。

図 11 には集熱効率と集熱器代表温度の関係を示した。熱回収の温水が循環しているため時間経過に伴って代表温度が上がる。グラフは 10:00~13:00 のデータをプロットしている。11 月 13 日の実験では代表温度が 29°C から 41°C 程度に変化し、1 月 22 日の実験では 22°C から 35°C 程度に変化した。代表温度が上昇すると効率が低下する傾向が現れている。30°C の水を 40°C に温めると仮定すると代表温度は 35°C である。図 11 の分布によれば、集熱効率は 0.6~0.7 になると予想される。実際に 11 月 13 日の実験では 12:00~13:00 の時間帯に出口温度 45°C が観測されている。

4.4 受光部温度の測定

2021 年 12 月に行った集熱実験の際に真空ガラス管が破損した¹⁴⁾。真空ガラス管を取り替えて実験を行ったが再度破損した。水を取り出す配管が取り付けられている東側の端付近のガラス部が割れたことから、部材の熱膨張の違いによるものと推測された。なお、配管はミラー端部の外側に位置している。そこで、2022 年 12 月に真空ガラス管を塩ビ管に取り替えて集光実験を行った¹⁵⁾。水は循環させないので集光部の熱は大気中に自然に放熱する状態である。破損部付近の塩ビ管表面の温度を放射温度計で計測したところ、11 時半~13 時半の間に 150~170°C が観測された。234°C を観測した日もあった。目視で集光状況を確認したところ東側塩ビ管表面に集光のムラが観察されたので、局所的に入射密度が上がり、部分的に温度が上昇してガラスが破損したと考えられる。この集光ムラはミラーを成形するときの形状の歪みに起因する。

この結果より、集光ミラーによる光強度の増加が確認できたが、従来の真空ガラス管を転用する場合には、集光ムラが生じないようにミラーを成形する対策が必要になると考えられる。

5. おわりに

本研究では建物の壁面に垂直設置される集光系つき太陽集熱器を製作し、その集熱性能を実験によって実測した。集光系は上部が放物線、下部が放物線と滑らかにつながるインボリュート曲線で構成され、アルミ製ミラーを使って

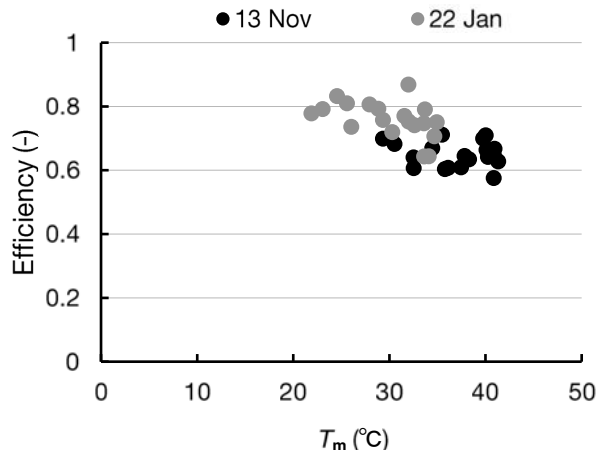


Fig. 11 Heat collection efficiency of the proposed concentrator vs. representative temperature T_m .

作成した。同時に集光系なしの真空ガラス管単体の集熱量も測定し、両者を比較した。小金井キャンパスにおいて 11 月~2 月に実験した結果、次の知見を得た。

- 提案する集熱器は真空ガラス管単体に比べ、2~5 倍 (平均 3.0 倍) の集熱量が得られた。
- 提案する集熱器の集熱効率は 0.6~0.8 程度であった。集熱器代表温度が上昇すると集熱効率が低下する傾向が得られた。
- 集熱部を塩ビ管に取り替えて表面温度を測定したところ、ミラーの集光のムラによって部分的に 150~230°C 程度の高温になった。真空ガラス管端部の破損はこの高温での加熱のムラが原因と考えられる。

今回のミラー集光系を用いることにより受光部でのエネルギー密度が高まり、集熱部の温度が非常に高くなることが確認できた。ただし、真空ガラス管の破損のため 12 月の測定データが欠落しており、当該月の実験サンプルを増やすことが課題である。

提案する放物面鏡を用いた集熱器は建物壁面への設置を想定している。冬季は太陽高度が低くなるので壁面を使う集熱は有利に働く。カーボンニュートラルを達成するには熱の脱炭素化が不可避であり、太陽熱を給湯等の熱源に利用することは有効である。本研究で製作した壁面設置型の太陽集熱器は ZEB や ZEH の実現に寄与すると期待される。

記号定義

- A : 集光系前面垂直面積 (m^2)
- c_w : 水の比熱 (J/kgK)
- I : 垂直面日射量 (W/m^2)
- \dot{m} : 水の流量 (kg/s)
- Q : 集熱量 (W)
- T_a : 外気温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{in} : 入口温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- T_m : 代表温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{out} : 出口温度 ($^{\circ}\text{C}$)

U : 熱通過率 (W/m^2K)

α : 吸収率 (-)

η : 集熱効率 (-)

τ : 透過率 (-)

参考文献

- 1) Japan Solar Heat Association homepage, Apartment houses (accessed July 2024), <http://www.ssda.or.jp/example/apartment/> (in Japanese)
- 2) P. Alamdari, M. Khatamifar, W. Lin, Heat loss analysis review: Parabolic trough and linear Fresnel collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114497, (2024).
- 3) R. Winston, C. Juan, P. Benítez, *Non-Imaging Optics*, (2005), Elsevier Academic Press, Cambridge.
- 4) R. Leutz, A. Suzuki, A. Akisawa, T. Kashiwagi, Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators, *Solar Energy*, 65(6), 379-387, (1999).
- 5) Jyukankyo Research Institute, 平成 21 年度太陽熱高度利用システムフィールドテスト事業に関するガイドラインの策定ならびに普及に向けた先導技術動向などに係る業務報告書, P07018, 53(2009), NEDO, Kawasaki. (in Japanese)
- 6) A. Radwan, E.M. Abo-Zahhad, I.I. El-Sharkawy, Z. Said, O. Abdelrehim, S. Memon, P. Cheng, A.S. Soliman, Thermal analysis of a bifacial vacuum-based solar thermal collector, *Energy*, 294, 130748, (2024).
- 7) L.J. Shah, S. Furbo, Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions, *Applied Energy*, 78, 371-395, (2004).
- 8) T.K. Mallick, P.C. Eames, T.J. Hyde, B. Norton, The design and experimental characterisation of an asymmetric compound parabolic photovoltaic concentrator for building facade integration in the UK, *Solar Energy*, 77, 319-327, (2004).
- 9) S. Ángel-Gómez, S. Bernal-del Río, E. Betancur, G. Osorio-Gómez, Designing a cost-efficient BICPV for vertical facades: Simulation and experimental evaluation, *Energy for Sustainable Development*, 79, 101400, (2024).
- 10) A. Akisawa, R. Kashiide, M. Nakayama, Design of wall-mounted solar collector with concentration by a parabolic mirror, *Journal of JSES*, 44(2), 59-64, (2018). (in Japanese)
- 11) A. Mboup, M. Nakayama, A. Akisawa, Design and performance evaluation of a wall mounted solar concentrating collector, *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100593, (2020).
- 12) Y. Yi, C. Zheng, L. Xiao, H. Luo, T. Lv, F. Chen, Model construction and energy harvesting investigation of shell shaped multi-section compound parabolic concentrator with solar vacuum tube, *Energy*, 294, 130643, (2024).
- 13) Japan Meteorological Agency, Database of past meteorological data, (accessed July 2024), <https://www.data.jma.go.jp/stats/etm/index.php> (in Japanese)
- 14) Taichi Shimoyama, Improvement and Performance Measurement of the Wall-mounted Solar Heat Collector Using Concentrating Mirrors, Bachelor thesis of Tokyo University of Agriculture and Technology, (2022). (in Japanese)
- 15) Rion Sakaguchi, Measurement of light collection performance of vertical solar heat collector using condensing mirror, Bachelor thesis of Tokyo University of Agriculture and Technology, (2023). (in Japanese)