

# 逆平板形太陽集熱器の集熱特性

三 浦 直 勝 ・ 西 田 元 夫 ・ 伊 藤 定 祐

## Thermal Performance of an Inverted Flat Plate Collector

Naokatsu MIURA, Motoo NISHIDA,  
and Sadasuke ITO

### Abstract

An inverted flat plate solar collector was constructed and the thermal performance was investigated experimentally. The following results were obtained. When the absorber plate of the collector had a selective surface, the collector with the reflectivity of 0.83 of the reflecting plate gave 25% to 30% higher collector efficiency in the absolute value than the collector with the reflectivity of 0.62. With the reflectivity of 0.62 of the reflecting plate, the collector with the absorber painted black gave 20% less efficiency than the collector with the absorber plate which had a selective surface. The collector efficiency at the solar elevation angle of 33 degrees was 10% higher than that at 62 degrees.

### 1. はじめに

太陽熱利用システムにおける集熱装置には大別して非集光型と集光型とがある。現在一般に使用されているのは非集光型の平板形集熱器であり、60℃以下程度の低い温度域においては高い集熱効率を示すが、一般に非集光型では100℃以上での中温度域における集熱には不向きであり、集光型が用いられている。集光型は光学系や太陽追尾装置を用いることにより、200～400℃の高温の集熱を比較的容易に得られるが、直達日射しか利用できず、装置も大型かつ複雑になる。また日本では年間全日射量の約半分が天空日射であり、直達日射しか利用できない集光型は直達日射と天空日射の両方を利用できる非集光型に比べ稼働率が低く不経済である。このため、非集光型での中温度域における集熱特性改善の目的で平板型集熱器の集熱面からの放射損失を防ぐために選択吸収面を用いるとか、集熱面とカバーガラスの間の空気層における対流損失を防ぐためにカバーガラスの多層化やハニカム構造の利用などが行なわれているが対流を完全に防ぐことはできない。最近原理的には完全に対流を防止できる非

集光型の逆平板形集熱器が考案され<sup>1)</sup>、従来、非集光型では不可能であった150～200℃での集熱が可能になった。しかし、逆平板形集熱器に関する研究報告は少ない<sup>1),2),3)</sup>。

本報告においては、自作した逆平板形集熱器の集熱特性について報告する。

### 2. 記 号

$A$ : カバーガラスの開口面積	$[\text{m}^2]$
$c_p$ : 熱媒体の定圧比熱	$[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
$J$ : 単位面積, 単位時間当りの傾斜面日射量	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$K$ : 相当熱通過率	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$
$m$ : 熱媒体の質量流量	$[\text{kg}/\text{s}]$
$Q$ : 単位時間当りの集熱量	$[\text{W}]$
$Q = m \cdot c_p (T_o - T_i)$	
$q_a$ : 集熱器に吸収される熱量	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$q_c$ : 集熱量	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$q_t$ : 集熱器からの放熱量	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$T_a$ : 外気温度	$[\text{K}]$
$T_i$ : 熱媒体の集熱器入口温度	$[\text{K}]$
$T_m$ : 集熱器出入口の熱媒体平均温度	$[\text{K}]$
$T_o$ : 熱媒体の集熱器出口温度	$[\text{K}]$

$X$ :	$X = (T_m - T_a) / J$	$[m^2 \cdot K / W]$
$\alpha$ :	集熱板被膜の吸収率	$[-]$
$\varepsilon$ :	集熱板被膜の放射率	$[-]$
$\eta$ :	集熱効率	$[-]$
$\rho$ :	反射板の反射率	$[-]$
$\tau$ :	カバーガラスの透過率	$[-]$

### 3. 集 熱 量

集熱器の集熱量は次式のように、集熱器内に吸収された熱量と集熱器からの放熱量との差であらわされる。

$$q_c = q_a - q_l \quad (1)$$

また  $q_a$ ,  $q_l$  の概略値は次のように表わせる。

$$q_a = \tau \cdot \alpha \cdot \rho \cdot J \quad (2)$$

$$q_l = K(T_m - T_a) \quad (3)$$

式 (1), (2), (3) より集熱量  $q_c$  は

$$q_c = \tau \cdot \alpha \cdot \rho \cdot J - K(T_m - T_a) \quad (4)$$

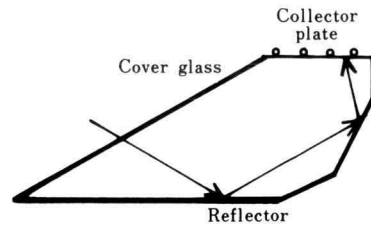
となる。一方集熱効率  $\eta$  は  $q_c / J$  であるから式 (4) は次のように書き換えられる。

$$\eta = \tau \cdot \alpha \cdot \rho - \frac{K(T_m - T_a)}{J} \quad (5)$$

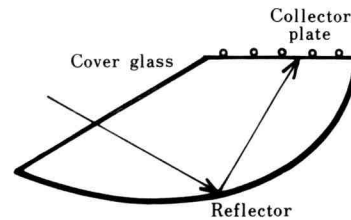
式 (5) で  $(\tau \cdot \alpha \cdot \rho)$  および  $K$  はほぼ定数として取扱えるため集熱結果を示す際に縦軸に集熱効率  $\eta$ 、横軸に  $(T_m - T_a) / J$  をとれば  $(T_m - T_a) / J$  の値が大きくなるにしたがって  $\eta$  が直線的に低下する関係が得られることがわかる。この様に縦軸に  $\eta$ 、横軸に  $(T_m - T_a) / J$  をとる集熱器の性能表示方法は、文献 (5) などにも見られるように一般的なもので今回の結果の表示にも使用することにする。

### 4. 逆平板形集熱器の概要

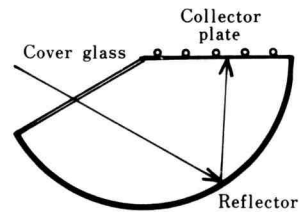
逆平板形集熱器の基本構造を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の (a) は反射面形状が平面、(b) は放物面、(c) は円弧面の場合である。逆平板形集熱器の特徴は集熱部を集熱器の上部に下向きに設置し、反射鏡を介して集熱部の下方より入射させて集熱することにある。このことにより集熱部の上部を断熱することができると共に、集熱部の下方では、上部ほど温度の高い空気層が存在することになり、自然対流を生じないため、対流による損失を防ぐことができる。反射面形状が平面または放物面では入射角度により入射光の一部が集熱面に到達しないという問題がある。しかし円弧面を用いると入射



(a) Flat plate type



(b) Parabolic type



(c) Cylindrical type

Fig. 1 Type of inverted flat plate collector

角度に関係なく、すべての入射光が集熱面に到達するので天空日射も有効に利用できる。我々の実験では反射板の形状には円弧面を用いることにする。逆平板形集熱器のカバーガラス面が南向きになるように設置した場合、集熱器上部へ入射した光は1回の反射で集熱板に到達するが、下部から入射した光はより多くの回数反射して集熱板に到達する傾向にある。入射光線は反射鏡で反射するごとにエネルギーが減少するので反射回数により到達した光線の熱量に差異が生じる。そこでガラス面全体から入射した直達日射が平均何回反射して集熱板に到達するかを二次元的に解析した。解析の方法については附録に示す。Fig. 2 はカバーガラス面を40分割し、各々の部分に入射した光線の反射回数を求め、それらをガラス面全体で平均した値を示すものである。同図からもわかるように太陽高度の

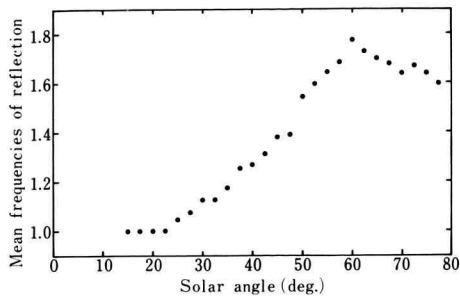


Fig. 2 Influence of solar angle on reflection

高い時期には日射が集熱面に到達するまでの平均反射回数は1.6回以上となるために集熱効率は悪くなり、太陽高度の低い時期には平均反射回数が1.2回以下となるために集熱効率が良くなるという特徴をもっていることがわかる。

## 5. 実験装置および実験方法

実験に使用した逆平板形集熱器の諸元を Table 1 に、構造を Fig. 3 に示す。逆平板形集熱器の構造は Fig. 3 に示すように反射面の形状は円弧で、集光比は1である。

Fig. 4 に実験装置図を示す。集熱器は東西方向に長くして横縦比を約4とし、集熱器内部の側面での光の反射の影響を小さくしてある。恒温槽で所定の温度に加熱された熱媒体（油）は循環ポンプにより集熱器に送られ、太陽熱で温められた後、流量計測用オリフィスをへて冷却器で冷やされて恒温槽にもどされる。実験に使用した熱媒体は水または鉱物油のスーパーハイ

Table 1 Data of inverted flat plate collector

Collector plate size material surface treating	2.8 m×0.72 m Cu Black paint ( $\alpha$ : 0.95, $\epsilon$ : 0.90) Black Cu ( $\alpha$ : 0.92, $\epsilon$ : 0.10)
Heat insulator	Foam polystyrene
Reflector material form	SUS 304 (Reflectivity: 0.62) Aluminum foil (Reflectivity: 0.83) Circular arc (Radius: 720 mm)
Cover glass	Sheet glass (Thickness: 3 mm) Transmittance: 0.90~0.86

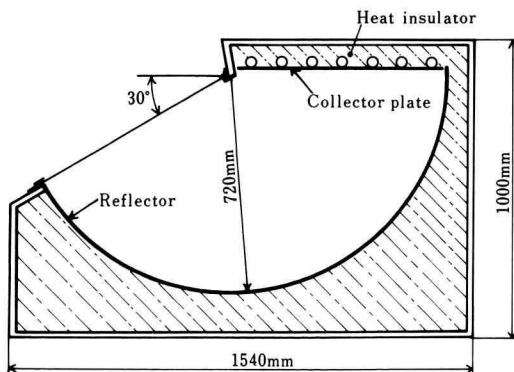


Fig. 3 Sectional view of inverted flat plate collector

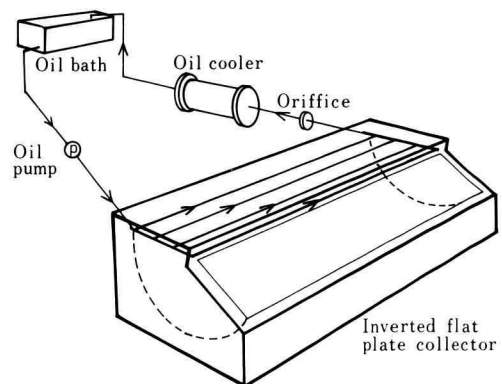


Fig. 4 Experimental apparatus

Table 2 Thermophysical properties of heat carrier

— Super Hyrando 56 —

		373 K	393 K
Density	[kg/m <sup>3</sup> ]	820	807
Specific heat	[kJ/(kg·K)]	2.31	2.27
Conductivity	[W/(m·K)]	0.140	0.138
Kinematic viscosity	[m <sup>2</sup> /s]	$2.44 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^{-6}$

ランド 56 で、その物性値を Table 2 に示す。

実験は流量  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 一定とし、熱媒体の集熱器入口温度を変えて集熱実験を行なった。集熱量は熱媒体の集熱器の出入口の温度差と流量から算出し、入射日射量は集熱器にカバーガラスと同じ傾斜角度で取付けられた全天日射計により計測した。各部の計測は5分毎に行ない、南中時前後30分間のデータを利用した。又反射率や集熱板表面の被膜が性能におよぼす影響を調べるために Table 1 に示すごとく集熱板には黒色ツヤ消シ塗装したもの、または選択吸収膜のものを、反射体にはステンレス板（反射率 0.62）またはアルミ箔（反射率 0.83）を用いて実験を行なった。

## 6. 実験結果および検討

実験結果を Fig. 5—Fig. 7 に示す。Fig. 5 は反射板に反射率 0.62 のステンレス・スチール板、集熱板に選択吸収膜付銅板を用いた場合に太陽高度が集熱効率におよぼす影響を示したものである。集熱効率の単位日射量当り、熱媒体相対温度差の影響を把握するために熱媒体平均温度  $T_m$  と外気温度  $T_a$  との差を日射量  $J$  で除した値  $\{(T_m - T_a)/J\}$  を  $X$  とすると  $X$  が 0.08 の時、太陽高度が 33 度では 62 度の時に比べ集熱効率が 10% 程高くなっている。これは逆平板形集熱器の特

徴である太陽高度の低い冬期に性能がよくなることを示している。

Fig. 6 は太陽高度 33 度、反射板の反射率 0.62 の場合の集熱板の被膜が集熱性能におよぼす影響を示したものである。黒色ツヤ消シ塗料を使用したものと選択吸収膜を使用したものとで集熱効率を比較すると、選択吸収膜を使用した方が同じ  $X$  の値のところでは約 20% 高くなっている。

Fig. 7 は反射率が集熱効率におよぼす影響を示したものである。反射率 0.83 の反射板を使用したものでは  $X=0.08$  で  $\eta=60\%$ 、 $X=0.12$  で  $\eta=45\%$  であるのに対し、反射率 0.62 を使用したものでは  $X=0.08$  で  $\eta=30\%$ 、 $X=0.12$  で  $\eta=15\%$  を示しており、同じ  $X$  の

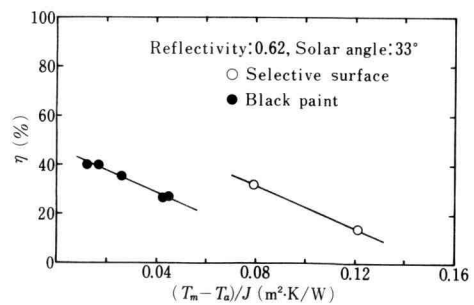


Fig. 6 Collector efficiency

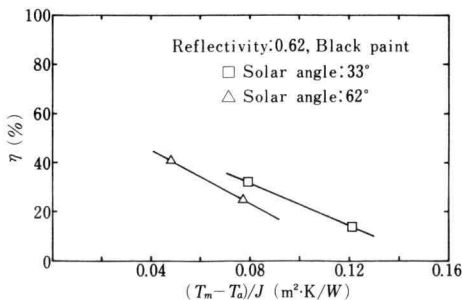


Fig. 5 Collector efficiency

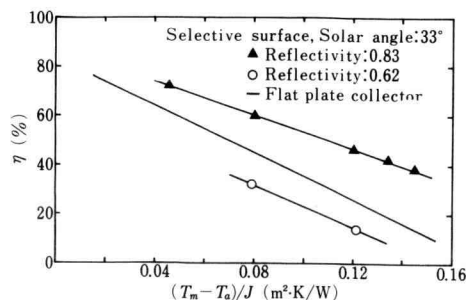


Fig. 7 Collector efficiency

高くなった。

本研究は卒業研究のテーマの一つとして昭和56年から始められたもので研究に携った石井慎二君、川村邦隆君、近藤和久君、後藤宏信君、中井浩一君、廣川志伸君、吉田武夫君に装置の製作および実験に協力していただいたので深く謝意を表します。

- 1) 作田ほか4名, 日本太陽エネルギー学会第3回研究発表会講演論文集(1977-12) p 9.
- 2) 作田ほか4名, 日本太陽エネルギー学会第4回研究発表会講演論文集(1978-11) p 93.
- 3) M.A. Broun, Proc. Comb. Pap. 1979 Flat Plate Sol. Collect Conf. (1979) p 221.
- 4) 種村・野口, 空気調和・衛生工学 Vol. 52 No. 9 (1978) p 863.
- 5) 日本太陽エネルギー学会, 太陽エネルギーの基礎と応用 (1978) p 70.

1. 選択吸収膜付集熱板を用いた集熱器の場合、反射率 0.83 の反射板を使用したものは反射率 0.62 を使用したものより集熱効率率は 30% 高くなった。
2. 反射率 0.62 の反射板を使用した場合、太陽高度が 33 度のときの集熱効率は太陽高度 62 度のときの集熱効率より 10% 程高くなった。
3. 反射率 0.62 の反射板を使用した場合選択吸収膜の集熱板を用いた集熱器は黒色ツヤ消シ塗料の集熱板を用いたものに比べて集熱効率は約 20%

式(6)および(7)より

太陽高度  $\theta_1$  の太陽光に対する反射板の平均反射回数を計算するために、カバーガラス  $\overline{OD}$  を  $N$  等分し、その分割された各々のカバー部に入射する太陽光の軌跡を計算し、且つそれぞれの反射回数を総和し、 $N$  で割って平均値を算出する。以下に  $N$  分割中の任意のガラス部の中心点  $A$  の座標を  $(x_1, y_1)$  とした場合、その部分に入射する太陽光の軌跡および反射回数について説明する。入射光線が反射板に当たる点  $B(x_2, y_2)$  の座標は、式 (6) で示される直線  $\overline{FB}$  と式 (7) で示される円弧の交点として求められる。

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (7)$$

$$y_2 = \frac{y_1 - x_1 \tan \theta_1 - \sqrt{r^2(1 + \tan^2 \theta_1) - (x_1 \tan \theta_1 - y_1)^2}}{1 + \tan^2 \theta_1} \quad (9)$$

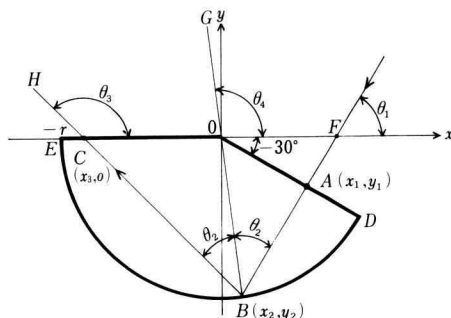


Fig. 8 Light paths reflection

点  $B$  において光線は正反射と仮定しているので図において  $\angle FBO (= \theta_2)$  は  $\angle OBC$  に等しい。 $\angle OFB$  は  $\theta_1$  であるので  $\angle GOF$  を  $\theta_4$  とすると

$$\theta_4 = \theta_1 + \theta_2 \quad (10)$$

一方  $\theta_4 = \tan^{-1}(y_2/x_2) + \pi$  (11)  
したがって,  $\theta_2$  は次式で得られる。

$$\theta_2 = \tan^{-1}(y_2/x_2) + \pi - \theta_1 \quad (12)$$

$\angle HCO$  を  $\theta_3$  とすると,  $\theta_3$  は次式で求められる。

$$\theta_3 = \theta_1 + 2\theta_2 \quad (13)$$

反射光  $\overline{BC}$  は次式で示される。

$$y = (x - x_2) \tan \theta_3 + y_2 \quad (14)$$

あるいは

$$y = (x - x_2) \tan \left\{ 2 \tan^{-1} \left( \frac{y_2}{x_2} \right) + 2\pi - \theta_1 \right\} + y_2 \quad (15)$$

点  $c$  は式 (15) と直線  $y=0$  との交点として求められるので

$$x_3 = x_2 - y_2 / \tan \left\{ 2 \tan^{-1} \left( \frac{y_2}{x_2} \right) + 2\pi - \theta_1 \right\} \quad (16)$$

点  $c$  において  $-r < x_3 < 0$  ならば反射光は 1 回で集熱面に到達したことになる。もし  $x_3 < -r$  ならば, 再び直線  $\overline{BC}$  と円弧との交点を求め, そこで反射した光線に対して, 先と同様な方法によって集熱板との交点を求める。以下同様のことをくりかえし, 各太陽高度におけるカバーガラス各部の入射光の反射回数を求めることができる。