

# 複合曲面反射鏡を用いた太陽熱集熱器の 集熱効率測定

Measurements of Heat Collection Efficiency of Collector  
having Mirror with Involute-Linear Curve

藤野充平\*・塚本守昭\*  
Michihira FUJINO Moriaki TSUKAMOTO

山本隆宣\*・横溝修\*  
Takanobu YAMAMOTO Osamu YOKOMIZO

隅田勲\*  
Isao SUMIDA

## ABSTRACT

A new type solar collector was manufactured as a trial in order to develop the excellent collector for air conditioning system. The developed collector is an evacuated glass-tube type collector having a mirror with involute-linear curve inside a glass-tube. The measured results of the heat collection efficiency are as follows;

- (1) The efficiency for low water temperature ( $t_w$ ) is lower than that of the current flat plate type collector, but becomes higher than that of the current collector in high water temperature region of  $t_w \geq 60^\circ\text{C}$ . The efficiency of 53% for  $t_w = 90^\circ\text{C}$  was obtained.
- (2) The efficiency is almost independent of the angle ( $\theta$ ) of incidence of the sun lights in the region of  $\theta \leq 30^\circ$ .

## 記号の説明

|          |                            |
|----------|----------------------------|
| $\eta$   | : 集熱効率                     |
| $Q$      | : 流量 (kg/h)                |
| $C_w$    | : 流体の比熱 (kcal/kg°C)        |
| $T_{wo}$ | : 集熱器出口の流体温度 (°C)          |
| $T_{wi}$ | : 集熱器入口の流体温度 (°C)          |
| $A$      | : ガラス管内径 (m)               |
| $L$      | : 反射鏡の軸方向長さ (m)            |
| $I$      | : 日射量 (kW/m²)              |
| $\beta$  | : 太陽光入射角                   |
| $T_w$    | : 流体平均温度 (°C)              |
| $T_o$    | : 外気温度 (°C)                |
| $a_t$    | : ガラス管の日射吸収率               |
| $D$      | : ガラス管外径 (m)               |
| $\alpha$ | : ガラス管から外気への熱伝達率 (kW/m²°C) |
| $T_t$    | : ガラス管温度 (°C)              |
| $R$      | : 夜間輻射量 (kW/m²)            |
| $C$      | : 热コンダクタンス (kW/m²°C)       |
| $T_c$    | : 集熱管温度 (°C)               |

$d$  : 集熱管と集熱板の半径方向断面の周囲長さ  
(m)

$\tau$  : ガラス管の日射透過率

$\rho$  : 反射鏡の反射率

$\alpha_c$  : 集熱管の日射吸収率

$\gamma$  :  $\frac{\text{集熱管内壁面積}}{\text{集熱板表面積} + \text{集熱管外壁面積}}$

$K_w$  : 集熱管から流体への熱伝達率 (kW/m²°C)

$q$  : 流体が集熱管から吸収する熱量 (kW)

$\varepsilon_c$  : 集熱管の熱輻射率

$\varepsilon_t$  : ガラス管の熱輻射率

$C_r$  : 輻射による熱コンダクタンス (W/m²°C)

$C_c$  : 対流による熱コンダクタンス (W/m²°C)

## 1. 緒言

太陽熱を住宅の給湯、冷暖房に利用する研究開発が盛んになっている<sup>1)2)</sup>。これらに使用する太陽熱集熱器（以下集熱器といふ）は流体の高温領域で高集熱効

\* 株式会社 日立製作所エネルギー研究所  
Energy Research Laboratory Hitachi Ltd.

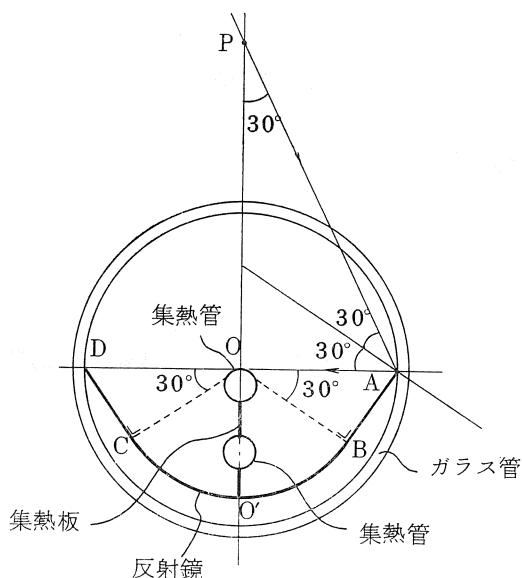


図 1 集熱器の構造(半径方向断面)

表 1 本集熱器に関する定数

|                      |      |   |       |
|----------------------|------|---|-------|
| ガラス管の日射透過率 $\tau$    | 0.85 | ガラス管外径 $D$ (m)  | 0.1   |
| 反射鏡の反射率 $\rho$       | 0.83 | ガラス管から外気への熱伝達率 $(\text{kW}/\text{m}^2\text{C})$               | 5.5*  |
| 集熱管の日射吸収率 $\alpha_c$ | 0.9  | 集熱管から流体への熱伝達量 $\gamma K_w$ ( $\text{kW}/\text{m}^2\text{C}$ ) | 206** |
| 集熱部の周囲長さ $d$ (m)     | 0.14 | ガラス管内径 $A$ (m)  | 0.095 |

\* 風速 3 m/s の風に対して直角にガラス管を置いた時の計算値

\*\* 流体が層流の時の計算値

率を必要とするが(例えば流体温度 90°C で集熱効率 50%以上), このような高温領域で高集熱効率を有する集熱器としては内部に平板状集熱板を用いた真空管式集熱器がある。本研究の目的はこの真空管式集熱器の性能をさらに向上させることを狙っている。

高集熱効率を得るために真空断熱ガラス管内の集熱部を集光型として、集光比が大きい集熱器を開発することを目指した。従来の集光型集熱器では反射鏡の断面形状として半円または放物線などが利用されているが、これらの反射鏡断面形状では集光比を高めることは困難であるため、半径方向断面が円弧と直線(複合曲面)を持った反射鏡を断熱ガラス管内に設置した。本報告ではこの集熱器の性能測定結果について述べる。

## 2. 集熱器の概要

集光比を高くするために図 1 に示すような反射鏡と集熱管の構造とした。すなわち、真空状態に保ったガラス管内に断面が半円形状の反射鏡を置き、反射鏡の

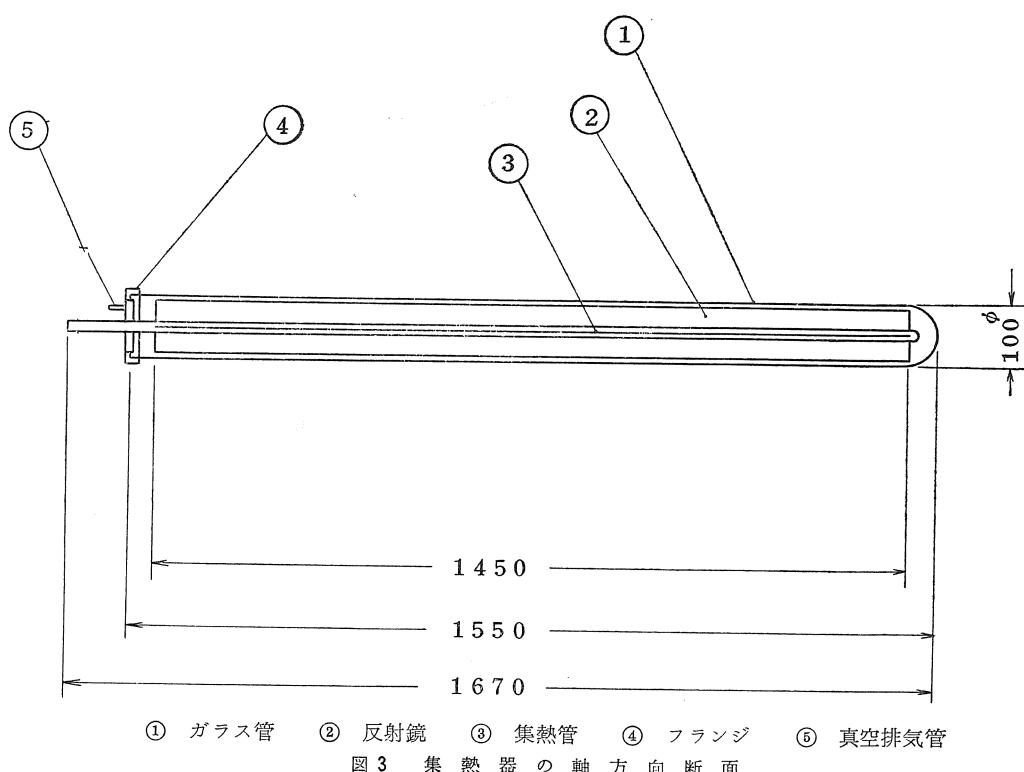
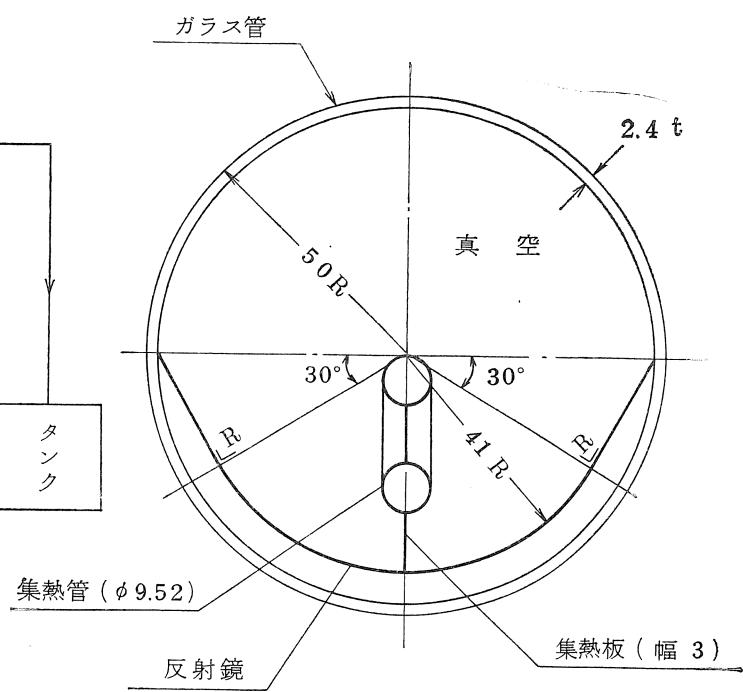
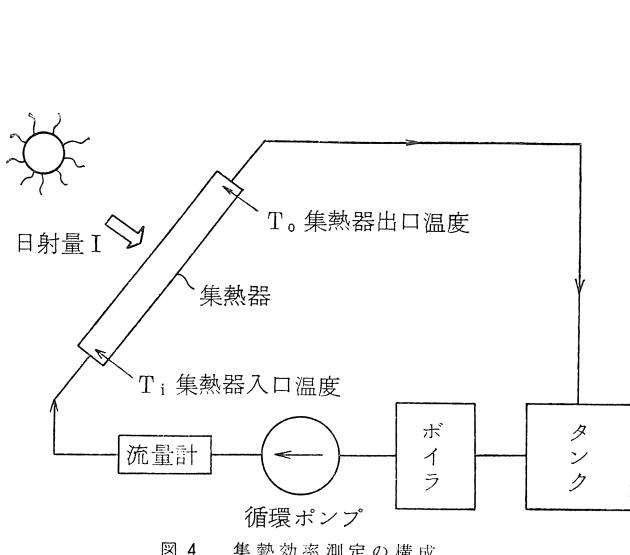
底中央に立てた垂直線上に集熱管を設置する。上部集熱管は流体の往路、下部は流体の復路である。反射鏡の CO'B は半径 OO' の円弧、CD、BA は直線であり、ガラス管中心OがC、DおよびB、Aを見張る角  $\angle COD$ 、 $\angle BOA$  は 30° である。このような構造で、表 1 で示した寸法の本集熱器の集光比は 1.15 となる。反射鏡の断面形状が半円の従来型集熱器では集光比を 1.0 以上にすることは困難である。また、断面形状が放物線では光軸が放物線の軸に平行、または平行に近い場合には集光比を 1.0 以上にできるが、光軸が傾くと反射光の一部が集熱部に入射しなくなり、この場合には集熱効率が急激に低下する。これを避けるためには太陽を追尾する必要があるが、機構が複雑になる。このように太陽非追尾式集熱器では集光比は 1.0 以下であり、本集熱器の集光比 1.15 は従来の集熱器の集光比よりも大きくなっていることが判る。

なお今回試作した集熱器は入射角が 30° 以内の太陽光はすべて集熱部に集まるように設計した。すなわち入射角が 30° で反射鏡の端 A に入射した太陽光線は A で反射して図のように集熱管の上端 O であるガラス管中心に入射する。入射角が 30° 以内の場合には P を通過した太陽光は反射鏡の端 A よりも内側の直線部または円弧部で反射し、集熱管の上端 O よりも下の集熱部に入射する。したがって集熱器の軸方向を東西に一致させ、反射鏡の軸 OO' を春分または秋分時の南中高度に合わせて集熱器を設置すれば夏至と冬至の太陽南中高度差が 47° であるから集熱器は年間を通して太陽光を集光することになる。

集熱器の半径方向断面および軸方向断面を図 2, 3 にそれぞれ示す。反射鏡には表面をアルミ蒸着した薄いアルミ板を使用した。銅製の集熱管、集熱板表面には酸化銅の選択吸収膜処理をした。集熱管をおおうパイレックスガラス管と SUS 製フランジは接着材を使用して真空封じをした。外箱には 9 本の集熱管を入れる。入口ヘッダから集熱管に入った温水は 3 本の集熱管を並列に流れ、出口ヘッダに出る。3 本の集熱管に並列に流すのは細い集熱管内径による流体の圧力損失をできるだけ小さくするためである。なお、集熱器 1 基当たりの集熱面積は 1.2 m<sup>2</sup> である。

## 3. 集熱効率測定

図 4 に集熱効率測定のプロックダイヤグラムを示す。ボイラによって流体温度を上昇させて流体温度と集熱効率の関係を調べたものである。集熱器出入口温度はクロメル・アルメル熱電対で測定し、日射強度は



全天日射計で測定した。ガラス管内の空気は真空ポンプで排気し、測定期間中ガラス管内を真空状態に保った。ピラニゲージで直読することによってガラス管内の真空度は約 0.08 Torr であることが判った。集熱効率は流体の集熱器出入口温度、流量値を用いて次式から求めた。

$$\eta = \frac{C_w Q(T_{wo} - T_{wi})}{ALI} \dots\dots\dots(1)$$

図 5 に集熱効率の測定結果を示す。横軸の  $T_w$  は液体の平均温度であり、次式から求めた。

$$T_w = \frac{T_{wo} + T_{wi}}{2} \dots\dots\dots(2)$$

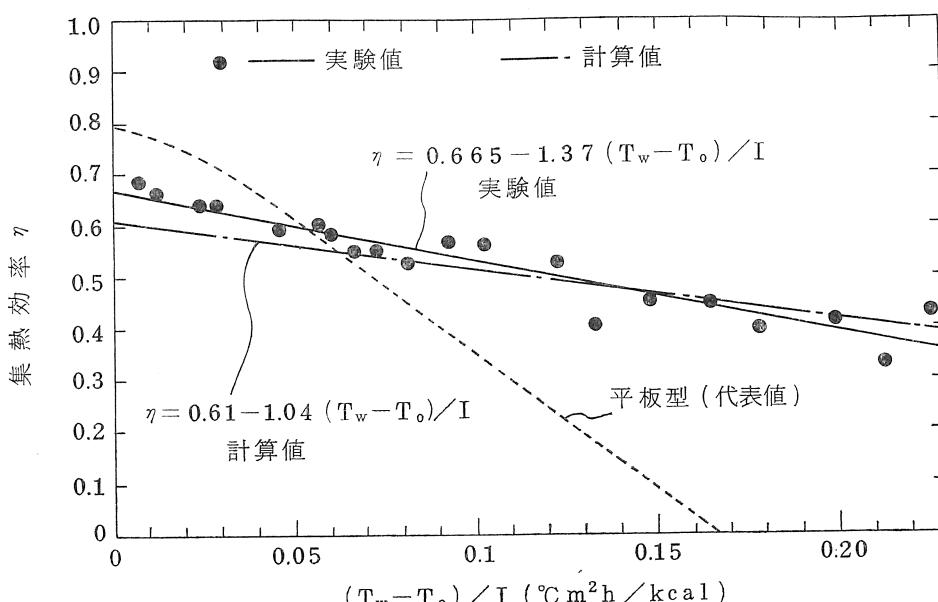


図 5 集熱効率測定結果と従来型集熱器との性能比較

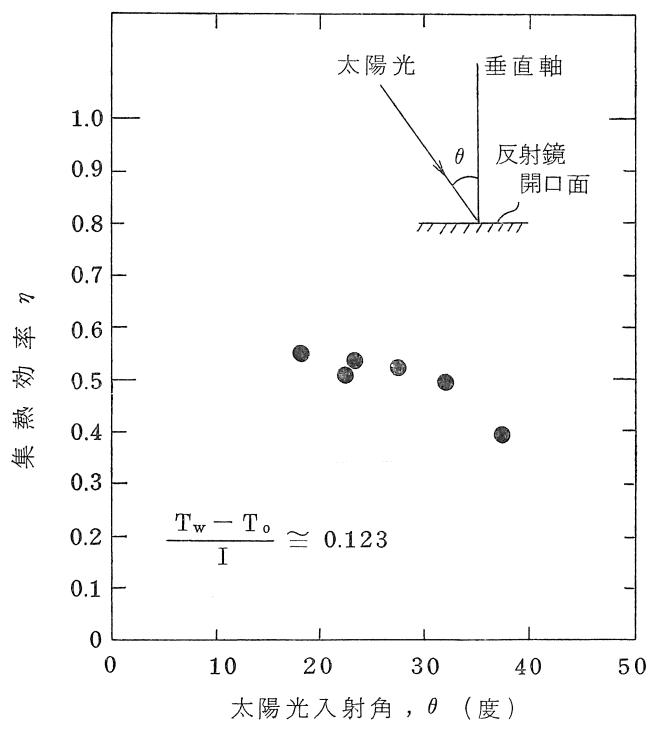


図 6 集熱効率の太陽光入射角依存性

測定結果を最小二乗法で整理して次の関係を得た。

$$\eta = 0.665 - 1.37(T_w - T_o)/I \dots \dots \dots (3)$$

同図に本集熱器の性能比較するために、従来の平板型集熱器の集熱効率の例<sup>1)</sup>を示した。水温が低い場合には平板型集熱器の熱集熱効率が本集熱器の集熱効率よりも高いが、水温が高い場合には本集熱器の集熱効率の方が平板型集熱器の集熱効率よりも高くなっている。本集熱効率が従来集熱器の集熱効率よりも高くなる水温は晴天時 ( $0.8 \text{ kW/m}^2$ , 外気温度  $20^\circ\text{C}$ ) で約  $60^\circ\text{C}$  であることが判る。また、水温が  $90^\circ\text{C}$  の場合に

は本集熱器の集熱効率は  $53\%$  となる。

図 6 に集熱効率の太陽光入射角依存性を示す。これは測定時刻が南中時で  $(T_w - T_o)/I$  の値が約  $0.123$  の場合の測定結果を示したものである。太陽光入射角が  $18^\circ$  以下の場合の測定結果が無いが、太陽光入射角が  $33^\circ$  以内の場合には集熱効率の変化は滑らかで入射角が  $38^\circ$  になると集熱効率が急に低下している。これは反射鏡で反射した太陽光をすべて集熱部に入射する太陽光入射角が  $30^\circ$  となる反射鏡の幾何学的条件から理解できることである。

#### 4. 検 討

##### 4. 1 集熱効率の計算

集熱器性能を詳細に検討するためには集熱効率を計算する。計算では次の事項を仮定した。

(1) 日射は直達日射のみを考え、反射鏡開口面に対して垂直に太陽光が入射するものとする。

(2) ガラス管および集熱管温度は場所によって変化しない。

(3) ガラス管および集熱管における日射の反射は無視する。

ガラス管、集熱管、流体に関する熱バランスは次式で表われる。

$$a_t ID = \alpha(T_t - T_o)\pi D + R\pi D - C(T_e - T_t)d \dots \dots \dots (4)$$

集 热 管

$$\tau\rho a_c IA = \gamma K_w (T_c - T_w) d + C(T_c - T_t) d \quad \dots \dots \dots (5)$$

流 体

$$q = \gamma K_w (T_c - T_w) d \quad \dots \dots \dots (6)$$

これらの式から  $T_c$ ,  $T_t$  を消去することにより、次式を得る。

$$q = k(T_e - T_w) \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$k = \frac{d}{\frac{1}{\gamma K_w} + \frac{1}{C} + \frac{d}{\alpha \pi D}} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$T_e = T_o - \frac{1}{\alpha} \left( R - \frac{\alpha_t D + \tau \rho a_c}{\pi D} I \right) \\ + \frac{\tau \rho a_c}{Cd} IA \quad \dots \dots \dots (9)$$

$T_e$  は相当外気温度で、 $T_e$  を表わす式 (9) の右辺第2項は夜間輻射およびガラス管における熱吸収の影響を表わす項であり、第3項は日射の集熱板における熱吸収の影響を表わす項である。ガラス管による熱吸収は集熱管による熱吸収に比較して、無視できるほど小さい。したがって、式 (9) は近似的に次式で表わすことができる。

$$T_e = T_o + \frac{\tau \rho a_c}{Cd} IA \quad \dots \dots \dots (10)$$

集熱効率  $\eta$  は式 (7), (8) および (10) から

$$\eta = \frac{q}{IA} = k_1 - k_2 (T_w - T_o) / I \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$k_1 = \frac{k(T_e - T_o)}{IA} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma K_w} + \frac{1}{C} + \frac{d}{\alpha \pi D}} \\ \cdot \frac{\tau \rho a_c}{C} \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$k_2 = \frac{k}{A} = \frac{d}{A} \frac{1}{\frac{1}{\gamma K_w} + \frac{1}{C} + \frac{d}{\alpha \pi D}} \quad \dots \dots \dots (13)$$

となる。本集熱に関する定数(表1)をこれらの式に代入して集熱効率を計算する。式 (12), (13) 内のガラス管と集熱管の熱コンダクタンス  $C$  についてはガラス管内が真空状態になっているため対流を無視し、輻射のみを考慮すると次式で表わされる。

$$C = C_r = \frac{\varepsilon_{ct} \sigma (T_c^4 - T_t^4)}{T_c - T_t} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\varepsilon_{ct} = \left\{ \frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{d}{\pi D} \left( \frac{1}{\varepsilon_t} - 1 \right) \right\}^{-1} = 0.1 \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここで集熱管とガラス管の熱輻射率を次式の様に近似する。

$$\varepsilon_c = 0.1, \varepsilon_t = 1.0$$

$C$  は  $T_c$ ,  $T_t$  とともに変化するが本実験のような  $30^\circ\text{C} \leq T_c \leq 100^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C} \leq T_t \leq 60^\circ\text{C}$  の範囲の場合には、ほぼ一定値 ( $0.75 \sim 0.98 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ) となるから

計算では中間値  $C = 0.87 (\text{W/m}^2\text{°C})$  と近似する。これらの条件で  $k_1$ ,  $k_2$  を計算し、 $\eta$  を求めると

$$\eta = 0.61 - 1.04 (T_w - T_o) / I \quad \dots \dots \dots (16)$$

を得る。式 (16) を実験値式 (3) と比較すると  $(T_w - T_o) / I$  が小さい領域では集熱効率の実験値が計算値よりも大きく、 $(T_w - T_o) / I$  に対する勾配  $k_2$  は実験の場合の方が、計算の場合よりも大きくなっている。 $k_1$  の実験値が計算値よりも大きい原因としてはガラス管の透過率、反射鏡の反射率が計算に使用した値よりも大きいためであると考えられる。また、 $k_2$  の実験値が計算値よりも大きい理由は、実験時の真空度  $0.08 \text{ Torr}$  ではガラス管内の対流が無視できないことによると考えられる。

#### 4. 2 ガラス管内の対流が集熱効率に与える影響

本実験ではガラス管内の真空度が  $0.08 \text{ Torr}$  とかなり悪く、ガラス管内で対流が生じていると考えられるため、対流が集熱効率に与える影響を検討する。

対流によるガラス管と集熱管の熱コンダクタンス  $C_c$  は次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$C_c = 0.559 (T_c - T_t)^{0.258} (\text{W/m}^2\text{°C}) \quad \dots \dots \dots (17)$$

本実験のような  $10^\circ\text{C} \leq T_c - T_t \leq 50^\circ\text{C}$  の範囲では  $C_c$  は  $1.0 \sim 1.5 (\text{W/m}^2\text{°C})$  となるから、 $C_c$  の近似値として  $1.3 (\text{W/m}^2\text{°C})$  とした。対流を考慮するため式 (14) の  $C$  の代りに次式を用いて集熱効率を計算した。

$$C = C_r + C_c = 2.15 (\text{W/m}^2\text{°C}) \quad \dots \dots \dots (18)$$

式 (18) を式 (12), (13) に代入すると

$$\eta = 0.60 - 2.3 (T_w - T_o) / I \quad \dots \dots \dots (19)$$

を得る。式 (19) と式 (16) を比較すると  $k_1$  は対流の影響をほとんど受けないが、 $k_2$  は対流が生じると大きくなることが判る。これは対流によって生じる熱損失のため集熱効率が小さくなることから予想される。したがって、 $k_2$  の実験値  $1.37$  が対流を無視した計算値  $1.04$  よりも大きい理由はガラス管内の対流によるものであることが判る。

#### 5. 結 言

半径方向断面が円弧と直線から成る反射鏡、および集熱管を真空断熱ガラス管内部に設けた太陽非追尾型集熱器を試作し、集熱効率を測定した。

(1) 晴天時 (日射量  $700 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ , 外気温度  $20^\circ\text{C}$ )において水温が低い場合には集熱効率は従来の平板型集熱器の集熱効率より低いが、水温が約  $60^\circ\text{C}$  以上になると平板型集熱器の集熱効率より高くなり、水温が  $90^\circ\text{C}$  の場合には  $53\%$  にな

る。

(2) 太陽光入射角が  $30^{\circ}$  以内であれば集熱効率は  
ほぼ一定である。

#### 参考文献

- (1) サンシャイン計画調査研究成果報告書「太陽  
熱冷暖房、給湯システムの研究」空気調和・衛生  
工学会、太陽熱暖冷房委員会（昭和51年）  
(2) 小泉尚夫、他3名「空気集熱器の性能比較」

日本太陽エネルギー学会第4回研究発表会講演論  
文集、p.17（昭和53年）

#### 謝辞

実験に御協力いただいた日立製作所エネルギー研  
究所、小谷皓市氏、池田考志氏、横山巖氏、松本  
知行氏に深く感謝いたします。

（昭和55年9月11日 原稿受理）

