

真空ガラス管形太陽熱集熱器の非定常伝熱特性

(第1報, 実験ならびに非定常伝熱計算)

CHARACTERISTICS OF UNSTEADY HEAT TRANSFER FOR A SET OF
EVACUATED TUBULAR SOLAR COLLECTORS
(1st Report, Experiment and Unsteady Heat Transfer Calculation)

平 栄蔵*¹
Eizo HIRA

小山 繁*²
Sigeru KOYAMA

中山 隆*¹
Takashi NAKAYAMA

藤井 哲*³
Tetsu FUJII

Abstract

The characteristics of unsteady heat transfer for a set of evacuated tubular solar collectors are studied experimentally and numerically. The experimental apparatus is composed of a set of 10 evacuated tubular solar collectors and 48 pieces of infrared lamps instead of sun light. The experiments for dynamic characteristics are carried out on the following conditions: 1) the stepwise changing insolation at a constant water flow rate, 2) the periodical changing insolation at a constant water flow rate. Then, the prediction calculations are carried out under the same conditions as experimental ones, and it is confirmed that the calculated values of the water temperature at the outlet of the set of collectors agree well with the measured ones. It is also demonstrated that the water temperature in the collector tube is not affected by the thermal radiation from the infrared lamp surface.

Key Words : Solar Energy, Evacuated Tubular Solar Collector, Unsteady State, Experiment, Numerical Calculation

1. 緒言

真空ガラス管形太陽熱集熱器は、真空状態の透明ガラス管の中に集熱フィンを置いた構造であり、比較的高い温度の集熱が可能である。この形式の集熱器の伝熱特性に関する研究は、例えば山東や種村ら^{(1)~(3)}の定常状態における集熱効率の測定法および光学的特性に関するもの、日野谷ら⁽⁴⁾の屋外での実測例、森ら⁽⁵⁾のハロゲンランプを光源に用いた場合の集熱特性に関するもの、斎藤ら⁽⁶⁾の赤外線ランプにより周期的日射を与えた場合の1本の集熱管の過渡特性に関する実験と解析および Bansal ら⁽⁷⁾の二重管式真空ガラス管形集熱器の過渡特性に関する解析などがある。しかしながら、多数の真空ガラス管形集熱管により構成された実用の太陽熱集熱器に関する非定常伝熱特性については十分な検討がなされていない。

本報では、日射量が時間的に変化する場合の真空ガラス管形集熱器の非定常伝熱特性を検討するため、100V,200Wの赤外線ランプ48個を用いた投光装置を製作し、日射量および供給温水流量を変えた場合の集熱器出口温度の時間的変化を調べた。そして、本集熱器の非定常伝熱に関する数値計算を行い、その結果と実測値を比較した。また、赤外線ランプ表面からの熱放射が集熱器出口温水温度に及ぼす影響を考察した。

主な記号

| | |
|--|-------------------|
| A : y方向の単位長さあたりの表面積 | m ² /m |
| B : y方向から見た断面積 | m ² |
| C : y方向の単位長さあたりの熱容量 | (kJ/K)/m |
| c : 接続管および集熱管構成材料の比熱 | kJ/(kg·K) |
| cf : 温水の定圧比熱 | kJ/(kg·K) |
| Dg : 透明ガラス管の内径 | m |
| d : 接続管および集熱板水管の内径 | m |
| F _{gu,lamp} : ガラス管と赤外線ランプ群の形態係数 | - |
| Gr : グラフホフ数 | - |

* 原稿受付 平成8年2月15日
* 1 宮崎県工業試験場(〒880 宮崎市恒久1-7-14)
* 2 九州大学機能物質科学研究所(〒816 春日市春日公園6-1)
* 3 東亜大学大学院(〒751 下関市一の宮学園町2-1)

- h : 熱伝達率 W/(m²·K)
 - I : 日射量 W/m²
 - L : 接続管および集熱板水管の温水流れ方向の長さ m
 - m : 温水流量 kg/h
 - Nu : ヌセルト数 -
 - Pr : プラントル数 -
 - Q : y方向の単位長さあたりの光学的受熱量 W/m
 - Re : レイノルズ数 -
 - S : y方向の単位長さあたりの投影面積 m²/m
 - T : 温度 ℃,K
 - t : 時間 sec
 - W : 集熱板の幅 m
 - y : 接続管および集熱管の温水流れ方向の座標 m
 - α_s : 太陽光吸収率 -
 - β_s, β_i : 太陽光および赤外光反射率 -
 - Δt : 計算時間幅 sec
 - γ_{ij} : 光学的係数 (i=1~3, j=1~4) -
 - ϵ_i : 赤外光放射率 -
 - λ : 接続管および集熱管構成材料の熱伝導率 W/(m·K)
 - ρ : 接続管および集熱管構成材料の密度 kg/m³
 - σ : ステファン・ボルツマン定数 W/m² K⁴
 - τ_s, τ_i : 太陽光および赤外光透過率 -
- 添字
- a : 周囲
 - f : 温水
 - fi : 集熱器入口の温水
 - fj : 接続管内の温水
 - fo : 集熱器出口の温水
 - fp : 集熱板水管内の温水
 - gl : 下面ガラス管
 - gu : 上面ガラス管
 - i : 入口
 - j : 接続管
 - l : 下面または床面
 - lamp : 赤外線ランプ
 - o : 出口
 - p : 集熱板 (水管を含む)
 - pu : 集熱板上面
 - pl : 集熱板下面
 - s : 天井

2. 集熱実験装置と方法

図 1(a)に実験装置の全体を、また図 1(b)にガラス管、集熱フィンおよび水管よりなる真空ガラス管形集

熱ユニット(以降、集熱管と呼ぶ)、ならびに集熱管と集熱管を連絡する水管(以降、接続管と呼ぶ)の配置を示す。実験装置は10本の集熱管を収容した真空管ガラス管形太陽熱集熱器1セット(三洋電機製STC-BH250型)と100V,200Wの赤外線ランプ48個を用いて製作した投光装置および温水供給システムより構成されている。1本の集熱管は長さが2490mmで、真空状態の透明ガラス管(外径80mm,厚み2mm)の中にアルミニウム製の集熱フィン(幅70mm,厚み1mm)で上面は選択吸収膜処理、下面は未処理)および集熱フィンと圧着接合された外径12.7mm,厚み0.9mmの銅製の水管(以降、この集熱フィンと水管を集熱板と呼ぶ)が内蔵されている。一方、集熱管と集熱管とを連絡する接続管も外径12.7mm,厚み0.9mmの銅製で、その長さは接続管(1)と(11)が約220mm,膨張ベローズ付きの接続管(2),(4),(6),(8)および(10)が約400mm,接続管(3),(5),(7)および(9)が約320mmである。投光装置の赤外線ランプは直径が127mmで、集熱器の上方約1.0mに横方向に6個、長手方向に8列配置した。集熱板上面位置での日射量は全天日射計(英弘精機製,MS-42型)を用い、そのばらつきが±10%以内になるように赤外線ランプの位置を微調整した。温水は蛇管式熱交換器と水道水供給管を内蔵し

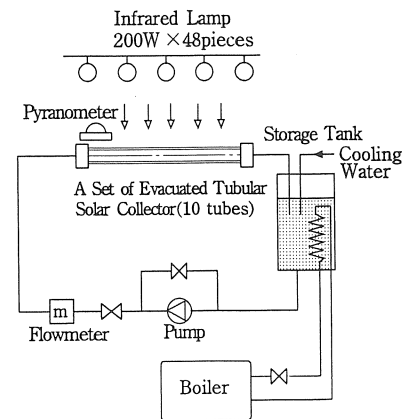


図 1(a) 実験装置全体

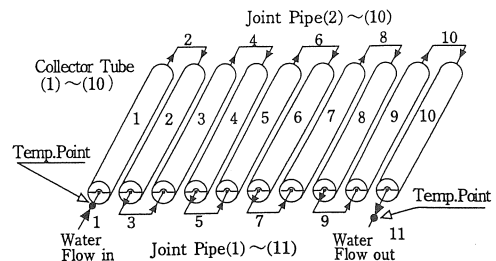


図 1(b) 集熱管と接続管の配置

た内容積 0.2 m³ の温水タンク (設定温度 ± 0.2 °C 以内) から、循環ポンプ、温水流量計 (米国ベアリングレスフローメータ社製、光ファイバー式ベアリングレス流量計、E-15 型) を経て集熱器へ供給した。温水温度は集熱器入口 (= 接続管 (I) の入口) および出口 (= 接続管 (II) の出口) の管内中央に挿入した外径 0.65mm の T 型シース熱電対で、また周囲の空気温度は集熱器から約 3m 離れた実験室内の遮光部で測定した。熱電対の起電力は冷却式基準温度補償器 (小松エレクトロニクス製、ZC-114 型、0 ± 0.02 °C) を介してペンレコーダ (チノー製、EB-22005 型) で記録した。

実験は集熱器の非定常伝熱特性を把握するため、以下の 3 種類について行った。

(I) 温水流量 m を 26.8kg/h (温水の集熱器通過時間 = 360sec) とし、日射量 I を 232 ~ 457W/m² の範囲でステップ的に与えた場合の集熱器出口の温水温度の時間的変化を調べた。

(II) 温水流量 m を 13.4 ~ 40.2kg/h (温水の集熱器通過時間 = 240 ~ 720sec) とし、日射量 $I=457W/m^2$ をステップ的に与えた場合の集熱器出口の温水温度の時間的変化を調べた。

(III) 温水流量 m を 26.8kg/h とし、2 系統の電源電圧を赤外線ランプ群に供給することにより発生させた高低 2 段の日射量 ($I=457$ と $117W/m^2$) を任意の照射時間幅で交互に周期的に与えた場合の集熱器出口の温水温度の時間的変化を調べた。

3. 非定常伝熱計算の基礎式

図 2 に集熱器の計算モデルを示す。本モデルに基づき集熱器の非定常伝熱計算を行うが、その際以下の仮定をおく。

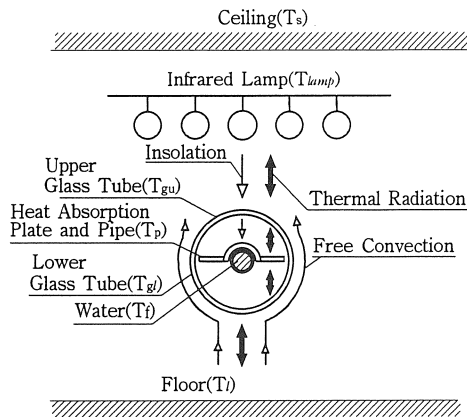


図 2 計算モデル

(1) 集熱板水管および接続管内の温水温度は混合平均温度で代表する。天井および床面の温度は周囲空気温度に等しいとする。ガラス管、集熱板および水管内温水は温水流れ方向 (y 方向) のみに温度分布を有するものとする。

(2) 集熱板は集熱フィンと水管の圧着接合構造であるが伝熱的には一体化しているもの⁽⁶⁾とする。また、ガラス管の温度は集熱板上面および天井面との間で相互熱放射を行う上面ガラス管と、集熱板下面および床面 (コンクリート面) との間で相互熱放射を行う下面ガラス管とに分けて計算する。

(3) 集熱器の接続管収納部内にはロックウールを詰め込み保温を強化しており、接続管外表面および集熱管両端面は完全に断熱されているものとする。また、ガラス管内部は真空状態であり、集熱板上下面とガラス管との間の対流熱伝達は無視する。

(4) 赤外線ランプ表面から集熱器への熱放射は無視する。ただし、この熱放射が集熱器出口温水温度に及ぼす影響については第 5 章で考察する。

(5) 温水および空気の熱伝達率は表 1 の定常熱伝達に関する経験式を用いる。また、集熱器構成材料の熱的および光学的物性値は温度変化に無関係に一定であるとし、表 2 および表 3 の値を用いる。さらに、温水および空気の熱物性値は文献⁽⁹⁾のデータを温度の 2 次式に近似して用いる。

表 1 計算に用いる熱伝達式⁽⁸⁾

| | |
|--|--|
| For inside of Fin Pipe and Joint Pipe (hr) | $\text{Num} = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot (d/L) \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}}{1 + 0.04 \cdot ((d/L) \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr})^{2/3}}$ |
| For outside of upper Glass-Tube (h_{gu}) and lower Glass-Tube (h_{gl}) | For upper Glass-Tube $\text{Num} = 0.424 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/4}$ For lower Glass-Tube $\text{Num} = 0.636 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/4}$ |

表 2 計算に用いる構成材料の熱物性値⁽⁹⁾

| Materials | ρ (kg/m ³) | c (kJ/kg·K) | λ (W/m·K) |
|------------|-----------------------------|---------------|-------------------|
| Joint Pipe | 8940 | 0.415 | 355 |
| Fin | 2730 | 0.893 | 193 |
| Fin Pipe | 8940 | 0.415 | 355 |
| Glass-Tube | 2520 | 0.96 | 1.10 |

表 3 計算に用いる光学的物性値^{(5), (10)}

| Materials | Sun Shine | | | Infrared Ray | | |
|------------|------------|----------|-----------|--------------|----------|-----------|
| | α_s | τ_s | β_s | ϵ_i | τ_i | β_i |
| Fin(upper) | 0.92 | 0 | 0.08 | 0.11 | 0 | 0.89 |
| Fin(lower) | 0.08 | 0 | 0.92 | 0.08 | 0 | 0.92 |
| Glass-Tube | 0.05 | 0.88 | 0.07 | 0.90 | 0.05 | 0.05 |

3.1 基礎式

接続管 (1) ~ (11) の熱バランス :

$$C_j \frac{\partial T_j}{\partial t} = B_j \lambda_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial y^2} + A_j h_{fj} (T_{fj} - T_j) \quad (1)$$

接続管 (1) 入口および接続管 (11) 出口の境界条件 :

$$y=y_i : \frac{\partial T_j}{\partial y} = 0, \quad y=y_o : \frac{\partial T_j}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

また, 接続管 (2) ~ (10) の出入口の境界条件 :

$$y=y_i, y=y_o : T_j = T_p, \quad B_j \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y} = B_p \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \quad (3)$$

集熱板 (1) ~ (10) の熱バランス :

$$C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = B_p \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + Q_p + A_p h_{fp} (T_{fp} - T_p) \quad (4)$$

集熱板 (1) ~ (10) 出入口の境界条件 :

$$y=y_i, y=y_o : T_p = T_j, \quad B_p \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} = B_j \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y} \quad (5)$$

上面ガラス管 (1) ~ (10) の熱バランス :

$$C_{gu} \frac{\partial T_{gu}}{\partial t} = B_g \lambda_g \frac{\partial^2 T_{gu}}{\partial y^2} + Q_{gu} + A_{gu} h_{gu} (T_a - T_{gu}) \quad (6)$$

上面ガラス管 (1) ~ (10) の境界条件 :

$$y=y_i, y=y_o : \frac{\partial T_{gu}}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

下面ガラス管 (1) ~ (10) の熱バランス :

$$C_{gl} \frac{\partial T_{gl}}{\partial t} = B_g \lambda_g \frac{\partial^2 T_{gl}}{\partial y^2} + Q_{gl} + A_{gl} h_{gl} (T_a - T_{gl}) \quad (8)$$

下面ガラス管 (1) ~ (10) の境界条件 :

$$y=y_i, y=y_o : \frac{\partial T_{gl}}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

ここに, 式 (4),(6) および (8) 中の光学的受熱量 Q_p , Q_{gu} および Q_{gl} は式 (10),(11) および (12) である.

$$Q_p = \gamma_{11} S_p I + \gamma_{12} S_{pu} (T_{gu}^4 - T_p^4) + \gamma_{13} S_{pl} (T_{gl}^4 - T_p^4) \quad (10)$$

$$Q_{gu} = \gamma_{21} S_p I + \gamma_{22} S_{pu} (T_p^4 - T_{gu}^4) + \gamma_{23} S_{gu} (T_s^4 - T_{gu}^4) \quad (11)$$

$$Q_{gl} = \gamma_{31} S_{pl} (T_p^4 - T_{gl}^4) + \gamma_{32} S_{gl} (T_s^4 - T_{gl}^4) \quad (12)$$

なお, 式 (10),(11) および (12) 中の光学的係数 $\gamma_{11} \sim \gamma_{13}$, $\gamma_{21} \sim \gamma_{24}$ および $\gamma_{31} \sim \gamma_{32}$ のうち, 日射の透過, 吸収および反射に関する光学的係数 γ_{11} , γ_{21} は森ら⁽⁵⁾の多重反射の式を用い, その他の相互熱放射係数は山東ら⁽¹⁾の計算式を用いる. すなわち,

$$\gamma_{11} = \frac{\tau_{sg} \alpha_{sp}}{1 - \beta_{sg}(1 - \alpha_{sp})} \quad (13)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\sigma}{1/\epsilon_{ipu} + 2W/\pi D_g(1/\epsilon_{ig} - 1)} \quad (14)$$

$$\sigma \quad (15)$$

$$\gamma_{13} = \frac{\sigma}{1/\epsilon_{ipl} + 2W/\pi D_g(1/\epsilon_{ig} - 1)}$$

$$\gamma_{21} = \alpha_{sg} + \frac{\tau_{sg} \alpha_{sp}(1 - \alpha_{sp})}{1 - \beta_{sg}(1 - \alpha_{sp})} \quad (16)$$

$$\gamma_{22} = \gamma_{12} \quad (17)$$

$$\gamma_{23} = \sigma \cdot \epsilon_{ig} \quad (18)$$

$$\gamma_{31} = \gamma_{13} \quad (19)$$

$$\gamma_{32} = \gamma_{23} \quad (20)$$

接続管 (1) ~ (11) 内温水の熱バランス :

$$C_{fj} \frac{\partial T_{fj}}{\partial t} = A_j h_{fj} (T_j - T_{fj}) + c_{fj} m_{fj} \frac{\partial T_{fj}}{\partial y} \quad (21)$$

集熱板 (1) ~ (10) 水管内温水の熱バランス :

$$C_{fp} \frac{\partial T_{fp}}{\partial t} = A_p h_{fp} (T_p - T_{fp}) + c_{fp} m_{fp} \frac{\partial T_{fp}}{\partial y} \quad (22)$$

接続管および集熱板水管内温水流れの接続条件は接続管 (1) ~ (11) と集熱板 (1) ~ (10) において, それぞれ対応した出入口温水温度を等しいとおく.

基礎式全体の初期条件 :

$$t \leq 0 : T_j, T_p, T_{gu}, T_{gl}, T_{fp}, T_{fj} = T_a \quad (23)$$

3.2 計算方法

集熱器を構成する接続管, ガラス管, 集熱板および温水温度は基礎式 (1),(4),(6),(8),(13) および (14) を前進差分近似し, それぞれの境界および初期条件により数値計算した. 計算時間幅 (Δt) は温水の通過時間を考慮して 0.5 または 1sec とした. 構成要素の分割数は解の安定条件⁽¹¹⁾を満足するように選んだ. すなわち, 温水流れ方向に接続管 (1) および (11) は 3 ~ 6 分割, 接続管 (2),(4),(6),(8) および (10) は 5 ~ 10 分割, 接続管 (3),(5),(7) および (9) は 4 ~ 8 分割した. 1 本の集熱管を構成する集熱板, ガラス管上面および下面はそれぞれ 31 ~ 62 分割した.

4. 実測値と計算値との比較

4.1 温水流量一定で異なる日射量をステップ的に与えた場合

図 3(a) は集熱器に, 温度 $T_{fi} = 40 \pm 0.2^\circ C$, 流量 $m = 26.8 kg/h$ (温水の集熱器通過時間 = 360sec) の温水を 30min 間供給した後, $I = 232,350$ および $457 W/m^2$ の日射量をステップ的に与えた場合の集熱器出口の温

水温度の実測値と計算値を示す。また、図 3(b) は図 3(a) の後に日射量 I を 0 とした場合を示す。図 3(a) および (b) の横軸は日射量をステップ的に変化させた後の経過時間 t で、縦軸は集熱器出口の温水温度 T_{fo} を示す。図中の \circ 、 \triangle および \square 印は日射量が 232, 350 および 457 W/m^2 の場合の集熱器の出口温水温度の実測値を、実線は実験条件に対応した集熱器出口の温水温度の計算値を示す (破線は赤外線ランプ表面からの熱放射を考慮した場合の計算値であり、後述する)。

図 3(a) より、昇温開始時刻 $t=0 \text{ sec}$ において \circ 、 \triangle および \square 印の場合の T_{fo} はいずれも 38°C 程度であり、入口温水温度 T_{fi} より約 2°C 低い。これは、日射がない状態での、集熱器から周囲への放熱によるものである。 $t=0 \sim 600 \text{ sec}$ において \circ 、 \triangle および \square 印の T_{fo} はいずれもほぼ直線的に昇温する。また、その温度上昇率は日射量が大きいくほど大きい。さらに、 $t=900 \text{ sec}$ 以降 \circ 、 \triangle および \square 印の T_{fo} はいずれもほぼ定常温度に達することがわかる。図 3(b) より、 T_{fo} は放熱開始

時刻直後から \circ 、 \triangle および \square 印の場合いずれもほぼ直線的に温度降下し、 $t=900 \text{ sec}$ 以降 T_{fi} より約 2°C 低い 38°C 程度で定常となることがわかる。

図 3(a) の昇温実験および図 3(b) の放熱実験の場合ともに実測値と計算値 (実線) はよく一致している。

4.2 異なる温水流量で一定量の日射をステップ的に与えた場合

図 4(a) は集熱器に、温度 $T_{fi}=40 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 、流量 $m=13.4, 26.8$ および 40.2 kg/h (温水の集熱器通過時間 $=720, 360$ および 240 sec) の温水を 30 分間供給した後、 $I=457 \text{ W/m}^2$ の日射量をステップ的に与えた場合の集熱器出口の温水温度の実測値と計算値を示す。また、図 4(b) は図 4(a) の後に日射量 I を 0 とした場合を示す。横軸は経過時間 t で、縦軸は集熱器出口の温水温度 T_{fo} を示す。図中の \circ 、 \triangle および \square 印は温水流量が $13.4, 26.8$ および 40.2 kg/h の場合の集熱器出口の温水温度の実測値を、実線は実験条件に対応した集熱

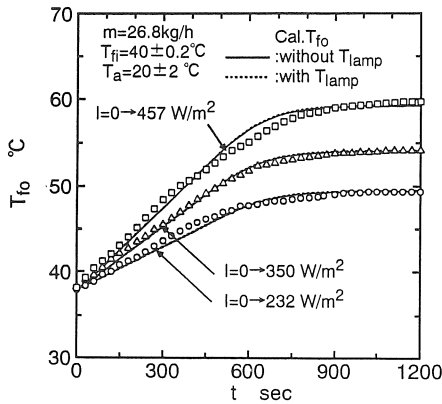


図 3(a) 昇温実験
(温水流量が一定で日射量異なる場合)

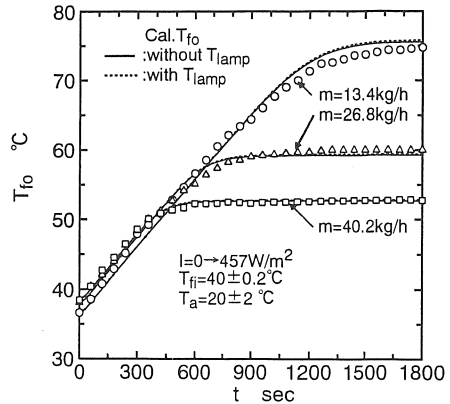


図 4(a) 昇温実験
(日射量が一定で温水流量異なる場合)

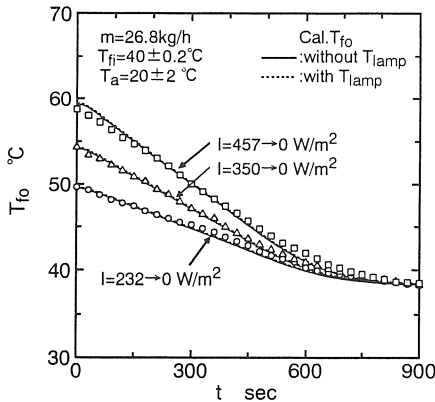


図 3(b) 放熱実験
(温水流量が一定で日射量異なる場合)

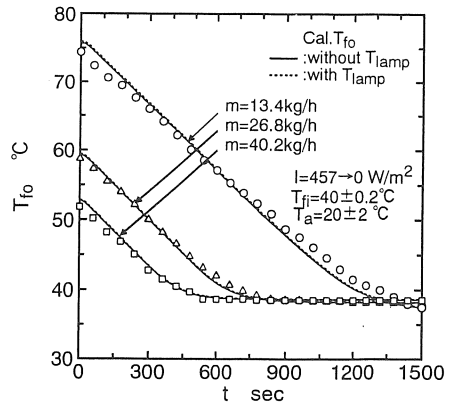


図 4(b) 放熱実験
(日射量が一定で温水流量異なる場合)

器出口温水温度の計算値を示す(破線は赤外線ランプ表面からの熱放射を考慮した場合の計算値であり、後述する)。

図 4(a) より、昇温開始時刻 $t=0\text{sec}$ において、集熱器出口温水の温度 T_{fo} は○印の場合約 37°C 、△の場合約 38°C および□印の場合約 38.5°C で入口温水温度 T_{fi} よりそれぞれ約 3.2 および 1.5°C 低い。これは、日射がない状態での、集熱器から周囲への放熱によるものであり、その温度低下幅は温水流量が小さいほど大きい。 $t=0 \sim 450\text{sec}$ の T_{fo} の温度上昇率は○、△および□印ともに大差がない。しかしながら、定常状態に到達するに要する時間は○印の場合約 $t=1500\text{sec}$ 、△印の場合約 $t=900\text{sec}$ および□印の場合約 $t=600\text{sec}$ である。また図 4(b) から、放熱開始時刻 $t=0\text{sec}$ より T_{fo} は○、△および□印ともに同様な温度降下率で直線的に降下し、○印の場合約 $t=1500\text{sec}$ 、△印の場合約 $t=900\text{sec}$ および□印の場合約 $t=600\text{sec}$ で定常温度に近づく。

図 4(a) の昇温実験および図 4(b) の放熱実験の場合ともに実測値と計算値(実線)はよく一致している。

4.3 温水流量一定で日射を周期的に変化させた場合

図 5 は温水流量一定で日射量を周期的に変化させた場合の集熱器入口・出口および各集熱管の出口の温水温度の時間的変化を示す。実験条件は温水流量 $m=26.8\text{kg/h}$ 、集熱器入口温水温度 $T_{fi}=40 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 、周囲の空気温度 $T_a=20 \pm 2^\circ\text{C}$ で、日射は 2 系統の電圧電源からの電圧を赤外線ランプ群に供給して日射量 $I=457\text{W/m}^2$ と 117W/m^2 を発生させ、集熱器に 180sec ごとに交互に照射した。横軸は経過時間 t 、縦軸は温

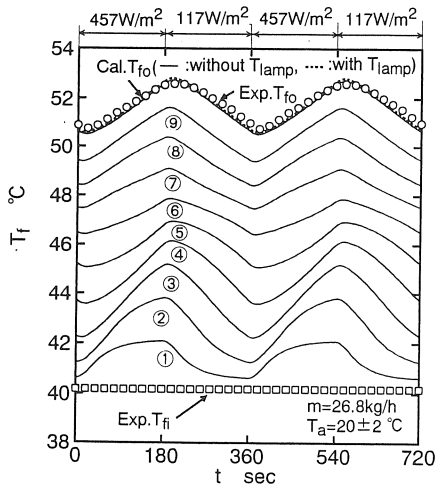


図 5 周期的日射を与えた場合の昇温実験

水温度 T_f である。図中の□および○印は集熱器入口および出口温水温度の実測値、①～⑨の実線は集熱管①～⑨の出口と接続管(11)の出口(=集熱器出口)の温水温度の計算値であり、実験開始から 1800sec 後の 720sec 間(温水通過時間で 2 周期)を示す(破線は赤外線ランプ表面からの熱放射を考慮した場合の計算値であり、後述する)。集熱器出口の温水温度の実測値(○印)より、集熱器出口での温水温度の変化時刻は日射の変化時刻から 15sec 程度遅れて変化すること、日射の周期的変化量が約 4 倍あるにもかかわらず出口温水温度の変化幅は約 2°C ときわめて小さいことがわかる。一方、集熱管①～⑨および集熱器出口の温水温度の計算値より、それぞれの集熱管出口の温水温度の最高と最低を与える時刻は、集熱管①～⑤では日射の変化時刻から次第に遅延し、⑤の場合で 20sec 程度遅れること、⑤→⑨では日射の変化時刻に近づき、⑨の場合で 10sec 程度の遅れを生ずることがわかる。それぞれの集熱管出口の温水温度の変化幅は、集熱管①→③では増大し、③の場合で 3°C 程度となること、ついで③→⑥では減少し、⑥の場合で 1.5°C 程度となること、そして⑥→⑨では再び増大し、⑨の場合で 2.3°C 程度となることわかる。また、集熱器出口での温水温度の変化時刻は接続管(11)を通過する温水流れの時間的遅れのため日射の変化時刻より 15sec 程度遅れること、温水温度の変化幅は 2.2°C 程度となることわかる。上述のように各集熱管出口の温水温度が複雑に変化するのには集熱管および接続管を構成する材料の蓄熱放熱効果や長さの異なる接続管を通過する温水流れの時間的遅れなどによるものである。なお、集熱器出口の温水温度の計算値(実線)はその位置の実測値(○印)とよく一致している。

5. 赤外線ランプ表面からの熱放射が集熱特性に及ぼす影響

本章では、赤外線ランプ表面からの熱放射が集熱特性に及ぼす影響について考察する。赤外線ランプ群表面と集熱器上面ガラス管の間の相互熱放射量を計算する際に以下の仮定をおく。

- (1) 赤外線ランプ表面から集熱器上面ガラス管を透過して集熱板に達する放射熱量は無視する。
- (2) 個々の赤外線ランプと集熱器上面ガラス管は対向した平面であるとする。
- (3) 赤外線ランプの表面温度は平均温度で代表し、ランプの配置に無関係に全数同一であるとする。

赤外線ランプ群表面から温水流れ方向の集熱器上面

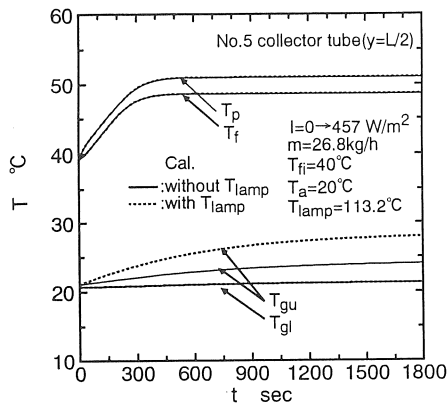


図6 赤外線ランプの熱放射の影響

ガラス管への熱放射量の基礎式は式(24)で与えられる。

$$Q_{lamp} = \gamma_{24} S_{gu} F_{gu,lamp} (T_{lamp}^4 - T_{gu}^4) \quad (24)$$

ここに、式(24)中の光学的係数 γ_{24} は式(25)である。

$$\gamma_{24} = \sigma \cdot \epsilon_{ig} \quad (25)$$

式(24)を第3章の光学的受熱量 Q_{gu} を表現する式(11)の右辺に付加して赤外線ランプ群表面からの熱放射の影響を計算するが、その際 $F_{gu,lamp}$ は差分計算に対応して分割した上面ガラス管から赤外線ランプ群への形態係数⁽¹²⁾を用いる。一方、赤外線ランプの表面温度は赤外線熱画像装置(日本アビオニクス製、TVS-3000システム)を用いて、赤外線ランプへの通電を停止した直後から5secごとにランプ表面を撮影し、そのデータより点灯時の赤外線ランプ表面の平均温度を外挿して求めた。その値は、 $I=457W/m^2$ の時 $T_{lamp}=113.2^\circ C$ 、 $I=350W/m^2$ の時 $T_{lamp}=102.4^\circ C$ 、 $I=232W/m^2$ の時 $T_{lamp}=91.1^\circ C$ および $I=117W/m^2$ の時 $T_{lamp}=72.2^\circ C$ あった。

図6は集熱器に温度 $T_{fi}=40^\circ C$ 、流量 $m=26.8kg/h$ の温水を30min間供給した後、 $I=457W/m^2$ の日射量をステップ的に与えた場合の、第5番目の集熱管の中央位置($y=L/2$)における集熱板 T_p 、集熱板水管内の温水 T_f 、上面ガラス管 T_{gu} および下面ガラス管 T_{gl} の温度の計算値を示す。横軸は日射量をステップ的に変化させた後の経過時間 t で、縦軸は上述した集熱器構成要素の温度 T を示す。図中の実線および破線は赤外線ランプ表面からの熱放射を無視した場合および考慮した場合を示す。 T_{gu} に関しては、赤外線ランプ群表面からの熱放射により1800sec後の破線と実線の温度差は約 $4^\circ C$ となる。一方、 T_p および T_f の場合の

実線と破線の温度差はほとんどない。すなわち、赤外線ランプ表面からの熱放射により上面ガラス管の温度は上昇するものの、集熱板の赤外光放射率が小さいため、集熱板の温度を大きく上昇させるには至らないものと考えられる。

図3(a),(b)、図4(a),(b)および図5中の破線は赤外線ランプ表面からの熱放射を考慮した場合の集熱器出口温水温度の計算値を示す。いずれの場合も実線との温度差は微小であり、本実験の範囲では赤外線ランプ表面からの熱放射が集熱器出口温水温度に及ぼす影響は少ないことがわかる。

6. 結 言

10本の集熱管を収納した1セットの真空ガラス管形太陽熱集熱器の非定常伝熱特性を把握するため、赤外線ランプを光源とする投光装置を用いて、①一定温水流量で異なる日射量をステップ的に与えた場合、②異なる温水流量で一定量の日射をステップ的に与えた場合および③一定温水流量で周期的日射を与えた場合の集熱実験を行った。そして、それぞれの実験条件に基づいて集熱器出口温水温度の計算を行い、計算値と実測値とがよく一致することを示した。また、赤外線ランプ表面からの熱放射が集熱器出口温水温度に及ぼす影響を計算し、本実験の範囲ではその影響は無視できる程度であることを示した。

終わりに、実験装置の製作および実験に協力いただいた宮崎県工業試験場の関係者はじめ、ご支援下さった皆様に感謝致します。

文 献

- (1) 山東・種村・ほか2名, 名工試所報, 30-6-7(1981), 198.
- (2) 山東・ほか3名, 空気調和・衛生工学論文集, 18(1982), 63.
- (3) 種村, 空気調和・衛生工学, 57-1(1983), 19.
- (4) 日野谷・ほか2名, 空気調和・衛生工学, 52-9(昭53), 859.
- (5) 森・ほか2名, 機論, 53-486, B(昭62), 608.
- (6) 斎藤・ほか2名, 機論, 52-473, B(昭61), 859.
- (7) N.K. Bansal-A.K. Sharma, Solar Energy, 32-1(1984), 67.
- (8) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第3版
- (9) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第4版
- (10) 三洋電機(株)カタログ
- (11) 片山・斎藤, 例えば, 機論, 38-306(昭47), 388.
- (12) 例えば, 頼実・ほか3名, 化学工学, 培風館