

平板形太陽熱集熱系の非定常伝熱特性*

(第2報, 集熱器の温度応答および集熱量の予測計算)

CHARACTERISTICS OF UNSTEADY HEAT TRANSFER FOR
A FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR SYSTEM

(2nd Report, Prediction Calculation of Thermal Response and Collected Solar Energy)

平 栄 蔵*¹
Eizo HIRA小 山 繁*²
Shigeru KOYAMA浜 崎 和 則*³
Kazunori HAMASAKI藤 井 哲*⁴
Tetsu FUJII

Abstract

In the present report, to obtain the basic data that is necessary to improve the performance of a flat-plate solar collector equipped with a thin transparent plastic film between cover glass and heat absorber plates, the numerical analysis of unsteady heat transfer characteristics of the flat-plate solar collector is carried out using the same calculation method as in the first report. The characteristics of thermal responses of the collector components are examined under condition that the insolation or the wind velocity or the water flow-rate changes stepwise or periodically. The effects of the thermophysical and optical properties of the collector components and the position of the thin transparent plastic film on the outlet water temperature and the collected solar energy are also clarified in case of periodic change of the insolation.

Key Words : Solar Energy, Flat-Plate Solar Collector, Thermal Response, Collector Efficiency, Unsteady Heat Transfer Calculation

1. 緒 言

平板形太陽熱集熱系は、熱放射、対流熱伝達、熱伝導などが相互に複合した伝熱系である。この系に関する諸条件、例えば日射量や風速などが変化した場合、集熱系を構成する要素はその熱物性値や伝熱形態にしたがい相互に干渉しながら温度変化しつつ、吸収した太陽エネルギーの一部を循環温수에伝える。このような集熱系の性能改善を図るためには、まず集熱系を構成する伝熱要素ごとの熱移動を把握し、その影響を予測することが重要である。

これらの観点に立った従来の研究としては、Kleinら⁽¹⁾、Hahneら⁽²⁾ および斎藤ら⁽³⁾、⁽⁴⁾ のものなどがあるが、対流防止用の透明テフロンフィルムが付設さ

れた集熱器と接続配管系からなる平板形太陽熱集熱系の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ようである。そこで、前報⁽⁵⁾ では、このような平板形太陽熱集熱系の実験装置を製作して、日射量や風速などが変化する場合の屋外集熱実験を行った。そして接続配管系を含めた集熱系全体の熱移動に関する数値計算を行い、その結果と実測値がよく一致することを確認した。

本報では、平板形太陽熱集熱器の性能改善の指針を得るために、本集熱器単体に関する非定常伝熱計算を行い、集熱器の温度応答および集熱器構成材料の熱的光学的物性値ならびに温水流量などが集熱特性に及ぼす影響を検討する。

おもな記号

A : y 方向の単位長さあたりの伝熱面積 m^2/m
a : 温度伝導率 m^2/sec
B : y 方向の断面積 m^2

*原稿受付 平成6年7月1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 鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元1-21-40)

*4 東亜大学大学院 (〒751 下関市一宮学園町2-1)

C	: y 方向の単位長さあたりの熱容量	(kJ/K)/m
c	: 集熱器構成要素の比熱	kJ/(kg·K)
c_f	: 温水の定圧比熱	kJ/(kg·K)
d	: 集熱パネル水管の水力直径	m
H	: 集熱パネルとテフロンフィルムの隙間	mm
h	: 熱伝達率	W/(m ² ·K)
I	: 日射量	W/m ²
L	: 集熱パネル下面断熱材の厚み方向の座標または集熱パネル水管長さ	m
m	: 温水流量	kg/h
Nu	: ヌセルト数	-
n	: 基本計算結果と他の計算結果の Qc の比	-
Pr	: プラントル数	-
Ra	: レイレイ数	-
Re	: レイノルズ数	-
Q	: y 方向の単位長さあたりの光学的受熱量	W/m
Qc	: 1 周期の集熱量の積算値	kJ
S	: y 方向の単位長さあたりの表面積	m ² /m
T	: 温度	°C, K
T*	: 無次元温度 = (T-Ti)/(Ts-Ti)	-
t	: 時間	h, min, sec
w	: 風速	m/sec
y	: 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	-
γ_{ij}	: 光学的係数 (i=1~3, j=1~4)	-
Δt	: 計算時間幅または周期時間幅	sec
ϵ_i	: 赤外光放射率	-
θ	: 温度変化幅 = Ts-Ti	°C
λ	: 集熱器構成要素の熱伝導率	W/(m·K)
ρ	: 集熱器構成要素の密度	kg/m ³
τ_s, τ_i	: 太陽光および赤外光透過率	-
χ	: 時定数, (T-Ti) が 0.632 × θ に達する時間	sec

添字

- a: 周囲
- f: 温水
- fi: 集熱器入口の温水
- fo: 集熱器出口の温水
- fp: 集熱パネル水管内の温水
- g: カバーガラス
- i: 初期値または入口あるいは内面
- k: テフロンフィルム
- kg: テフロンフィルムとカバーガラスの間
- L: 集熱パネル下面断熱材
- o: 出口または外面
- p: 集熱パネル

- pk: 集熱パネルとテフロンフィルムの間
- s: 定常値
- sky: 天空

2. 非定常伝熱計算の基礎式

数値計算の詳細は前報⁽⁵⁾で報告したので、ここでは仮定および基礎式のみ記述する。図1は本計算で対象とする平板形太陽熱集熱器の詳細図である。以下に仮定を示す。

- (1) 集熱パネル水管内温水の温度は混合平均温度で代表する。また、温水は27列ある集熱パネル水管に均等に流れるものとし、集熱器構成要素に關与する熱伝達率は表1の定常熱伝達に関する経験式を用いる。
- (2) 集熱パネル、テフロンフィルム(FEP Film 25 μ m)およびカバーガラスの温水流れ方向に直角な方向の温度分布はないものとする。一方、集熱パネル下面断熱材およびテフロンフィルムの温水流れ方向の材料内熱伝導は無視する。
- (3) 集熱パネル下面断熱材はグラスウールの一層構造とみなし、集熱パネルと下面断熱材は完全に接触しているものとする。また、集熱器側面は完全に断熱されているものとする。さらにテフロンフィルムおよびカバーガラスの表面積は集熱パネルの表面積 S_p に等しいとする。
- (4) テフロンフィルムの熱容量はカバーガラスや集熱

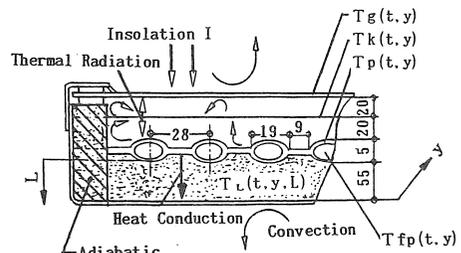
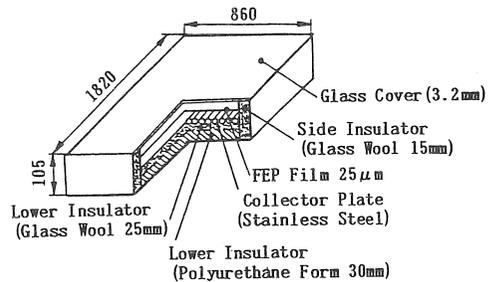


図1 平板形太陽熱集熱器の詳細図

表1 計算に用いる熱伝達式

For Inside of Collector Panel Pipe (h_{fp})	Hausen ⁽⁶⁾ $Nu=3.66+\frac{0.0668 \cdot (d/L) \cdot Re \cdot Pr}{1+0.04((d/L) \cdot Re \cdot Pr)^{1/4}}$
Between Panel and Film (h_{pk})	Silveston ⁽⁷⁾ $Nu=1$ $Ra \leq 1700$ $Nu=0.027 \cdot Ra^{1/2}$ $1700 < Ra \leq 6000$ $Nu=0.37 \cdot Ra^{1/5}$ $6000 < Ra \leq 30000$ $Nu=0.09 \cdot Ra^{1/3}$ $30000 < Ra$
Between Film and Cover-Glass (h_{kp})	
Between Collector Casing and ambient air (h_a)	Duffie ⁽⁸⁾ $h_a=5.7+3.8w$ $W/(m^2 \cdot K)$

表2 計算に用いる構成材料の熱物性値

Materials	ρ (kg/m ³)	c (kJ/(kg·K))	λ (W/m·K)	Ref.
Collect. Panel	7890	0.511	16.5	(9)
Cover-Glass	2520	0.96	1.10	
Glass Wool	16	0.87	0.51	

表3 計算に用いる光学的物性値

Materials	Sun Shine			Infrared Ray			Ref.
	α_s	τ_s	β_s	ϵ_i	τ_i	β_i	
Collect. Panel	0.85	0	0.15	0.20	0	0.80	(10)
Cover-Glass	0.05	0.88	0.07	0.90	0.05	0.05	(11)
FEP Film 25 μ m	0.02	0.90	0.08	0.45	0.50	0.05	

パネルのそれに比して1/1000オーダーであるので、無視する。

(5) 天空の温度は外気温度よりも15°C⁽¹⁰⁾低いものとする。

(6) 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。また、温水や空気熱物性値は文献⁽⁹⁾のデータを2次式に近似して用いる。

計算に用いる基礎式を以下に示す。

集熱パネル水管内温水の熱バランスとその境界条件：

$$C_{fp} \frac{\partial T_{fp}}{\partial t} = A_p h_{fp} (T_p - T_{fp}) + c_{fp} m \frac{\partial T_{fp}}{\partial y} \dots \dots \dots (1)$$

$$y = y_1 : T_{fp} = T_{fp1} \dots \dots \dots (2)$$

集熱パネルの熱バランスとその境界条件：

$$C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = B_p \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + Q_p + S_p h_{pk} (T_k - T_p) + A_p h_{fp} (T_{fp} - T_p) + S_p \lambda_L \left. \frac{\partial T_p}{\partial L} \right|_{L=L_1} \dots \dots \dots (3)$$

$$y = y_1, y = y_0 : \frac{\partial T_p}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

テフロンフィルムの熱バランス：

$$Q_s + S_p h_{pk} (T_p - T_k) + S_p h_{ks} (T_s - T_k) = 0 \dots \dots \dots (5)$$

カバーガラスの熱バランスとその境界条件：

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = B_g \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} + Q_g + S_g h_a (T_a - T_g) + S_p h_{ks} (T_k - T_g) \dots \dots \dots (6)$$

$$y = y_1, y = y_0 : \frac{\partial T_g}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、式(3)、(5)および(6)中の光学的受熱量 Q_p 、 Q_k および Q_g は式(8)、(9)および(10)である。なお、光学的係数 $\gamma_{11} \sim \gamma_{14}$ 、 $\gamma_{21} \sim \gamma_{24}$ および $\gamma_{31} \sim \gamma_{34}$ は、伊藤⁽¹⁰⁾が与えた多重反射の計算式より得られた数値を用いる。

$$Q_p = S_p [\gamma_{11} I + \gamma_{12} (T_k' - T_p') + \gamma_{13} (T_s' - T_p') + \gamma_{14} (T_{sk}' - T_p')] \dots (8)$$

$$Q_k = S_p [\gamma_{21} I + \gamma_{22} (T_p' - T_k') + \gamma_{23} (T_s' - T_k') + \gamma_{24} (T_{sk}' - T_k')] \dots (9)$$

$$Q_g = S_p [\gamma_{31} I + \gamma_{32} (T_p' - T_g') + \gamma_{33} (T_k' - T_g') + \gamma_{34} (T_{sk}' - T_g')] \dots (10)$$

集熱パネル下面断熱材の非常数熱伝導式とその境界条件：

$$\frac{\partial T_L}{\partial t} = a_L \frac{\partial^2 T_L}{\partial L^2} \dots \dots \dots (11)$$

$$L = L_1 : T_L = T_o \dots \dots \dots (12)$$

$$L = L_0 : \lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial L} = h_o (T_a - T_L) \dots \dots \dots (13)$$

基礎式全体の初期条件：

$$t \leq 0 : T_p, T_k, T_s, T_L = T_o \dots \dots \dots (14)$$

計算方法は前報と同様である。

3. 計算結果および考察

3-1 集熱器の温度応答

本節では定常状態にある集熱器に対し、時刻 $t=0$ minより日射量などがステップ的および周期的に変化する場合の集熱器構成要素の温度応答を検討する。計算は、日射量 I を600W/m²、集熱器入口温水温度 T_{fi} を60°C、外気温度 T_a を20°C、温水流量 m を171kg/h(この流量は前報⁽⁵⁾の集熱実験における流量範囲の中間値。ただし、温水流量の影響を計算した後述の図4では $m=114$ および228kg/h、風速 w を2m/sec(風速の影響を計算した後述の図5では $w=4$ m/sec)に固定し、集熱器構成要素の温度を定常状態としたのち、日射量あるいは風速の変化量を入力して行った。以下の図3~図6に示す集熱器構成要素の温度は図2に示した集熱器温水流れ方向中間点の構成要素の位置に対応している。なお、図中の温度表示のあとに温水流量 m (図4のみ)、ステップ的变化前後の温度変化幅 θ およびステップ变化後の温度変化が $0.632 \times \theta$ に達するのに要する時間(時定数 χ と定義する)(図3~図5)を付記した。

図3は、日射量が $t=0$ minで600W/m²から900W/m²にス

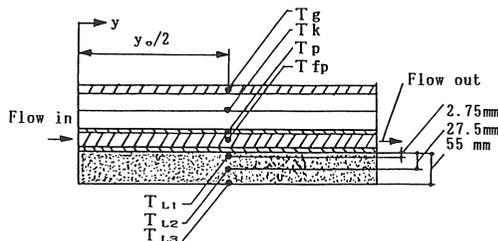


図2 集熱器構成要素の温度表示位置

ステップ的に変化した場合の集熱器構成要素の温度応答の計算結果を示す。横軸は経過時間 t で、縦軸は無次元温度 T^* である。集熱パネルの温度 T_p^* および集熱パネル水管内温水温度 T_{fp}^* は、日射量に変化した直後から急激に上昇して定常値となる。テフロンフィルムの温度 T_k^* は、日射量に変化した直後では T_p^* より急激に上昇するが、時間経過とともにその速度は小さくなり、定常値に達するまでに長時間を要する。集熱パネル下面断熱材の温度 $T_{L1}^* \sim T_{L3}^*$ は集熱パネル下面から離れるほど日射量の変化時刻より遅れて上昇し、定常値に達する時間も長くなる。カバーガラスの温度 T_g^* は日射量の変化とほぼ同時に上昇しはじめるが、 T_k^* と同様に定常値に達するまでに長時間を要する。

図4は、温水流量を変え($m=114$ および 228kg/h)、図3と同様な日射量の変化を与えた場合の温度応答を示す。 T_{fp}^* および T_{L3}^* は、温水流量が増すほどよりはやく

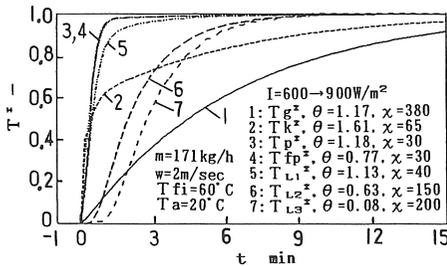


図3 集熱器構成要素の温度応答 (日射量がステップ的に変化した場合)

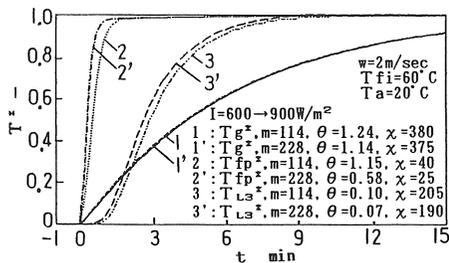


図4 集熱器構成要素の温度応答 (温水流量の影響)

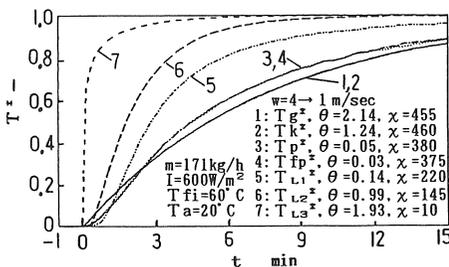
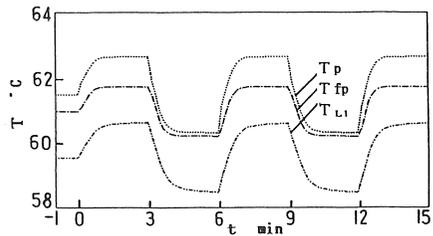


図5 集熱器構成要素の温度応答 (風速がステップ的に変化した場合)

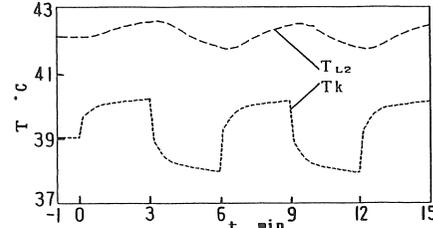
く定常値に達する。一方、 T_g^* は温水流量に無関係に上昇速度が小さく、定常値に達するまでに長時間を要する。

図5は、風速が $t=0\text{min}$ で 4m/sec から 1m/sec にステップ的に変化した場合を示す。 T_p^* および T_{fp}^* は風速の変化時刻よりやや遅れて上昇しはじめ、定常値に達するまでに長時間を要する。 T_k^* および T_g^* は風速の変化とほぼ同時に上昇しはじめるが、定常値に達するまでに長時間を要する。一方、 T_{L3}^* は風速の変化の直後より急激に上昇して定常値に達する。 T_{L2}^* 、 T_{L1}^* は断熱材の外表面から集熱パネル下面に近づくほど風速の変化時刻より遅れて上昇しはじめ、定常値に達するまでの時間も長くなる。

図6(a),(b)および(c)は日射量 $I=600\text{W/m}^2$ で定常状態にある集熱器に対し、時刻 $t=0\text{min}$ より 900W/m^2 で180sec間、 300W/m^2 で180sec間交互に周期的日射量を与えた場合の温度応答を示す。横軸は経過時間 t で、縦軸は構成要素の温度 T である。集熱パネルの温度 T_p 、集熱パネル水管内温水温度 T_{fp} 、テフロンフィルムの温度 T_k および集熱パネル下面断熱材の温度 T_{L1} は日射量の変化とほぼ同時に温度変化し、日射量の変化を緩和したプロフィールとなる。 T_k が T_p 、 T_{fp} および T_{L1} より



(a) T_p , T_{fp} , T_{L1}



(b) T_{L2} , T_k

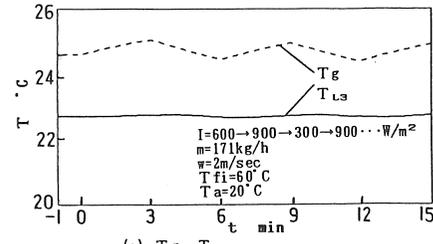


図6 集熱器構成要素の温度応答 (日射量が周期的に変化した場合)

り鋭敏な温度変化を示すのは、対流防止用のテフロンフィルムの熱容量が集熱パネルおよびカバーガラスの熱容量の1/1000オーダで、きわめて小さく（本計算では無視している）、またフィルムが入射太陽光をわずかながら吸収するためと考えられる（表3参照）。カバーガラスの温度 T_g は日射量の変化時刻よりわずかに遅れて変化し、1周期ごとの温度変化幅は小さい。集熱パネル下面断熱材の温度 T_{L2} および T_{L3} は集熱パネル下面から離れるほど日射量の変化時刻より遅れて変化し、1周期ごとの温度変化幅は急激に小さくなる。なお、日射量の周期的変化の時間幅を変えた場合の計算も行ったが、この結果より日射量の周期時間幅が短くなるほど、 T_g および T_{L3} の1周期ごとの温度変化は小さくなり、平均日射量を与えた場合の定常値に近づくことがわかった。

3.2 集熱器の性能予測

本節では平板形太陽熱集熱器の性能改善の指針を得るための数値計算を行い、集熱器構成要素の熱的および光学的物性値ならびに温水流量が集熱器出口温水温度に及ぼす影響を検討する。計算は、温水流量 m を171 kg/h（温水流量の影響を計算した後述の図10の場合は除く）、集熱器入口温水温度 T_{fi} を60°C、外気温度 T_a を20°C、風速 w を2m/secに固定して、日射量 I を900 W/m²で180sec間、300W/m²で180sec間交互に周期的に与え、各部の温度が周期定常状態になるまで行った。以下の図7から図12において図中に計算の条件を記す。さらにそのあとに、下線を付した基本計算条件の場合の1周期の集熱量積算値 Q_c と他の条件の場合の Q_c との比 n （基本計算条件を分母とする）を付記する。

図7は集熱パネルの熱容量を変えた場合の集熱器出口温水温度 T_{fo} の時間的変化の計算結果を示す。図中の長破線、実線、短破線、一点鎖線および二点鎖線はそれぞれ集熱パネルの熱容量 C_p を0.5, 1 (=基本計算), 2, 4および8倍した場合を示す。集熱パネルの熱容量の増減は集熱器出口温水温度のプロフィールを大きく変化させる。しかし、1周期間の集熱量の比は集熱パネルの熱容量に無関係にほとんど変化しない。

図8は集熱パネル下面断熱材の熱伝導率を変えた場合の計算結果を示す。図中の長破線、短破線、実線および一点鎖線はそれぞれ集熱パネル下面断熱材の熱伝導率 λ_L を0(完全断熱), 0.5, 1 (=基本計算) および2倍した場合を示す。断熱材の熱伝導率は小さいほど、放熱量が減少し集熱量の比は増加するが、上限値 (=1.14) がある。

図9は、集熱パネルとカバーガラスの隙間を40mmで一定として、集熱パネルとテフロンフィルムの空気層

隙間 H を変えた場合の計算結果を示す。図中の一点鎖線、実線、短破線および長破線はそれぞれ集熱パネルとテフロンフィルム間の空気層隙間が10, 20 (=基本計算), 5および1mmの場合である。空気層隙間が10mm程度の場合、集熱量の比はもっとも大きい。空気層隙間が10~20mmの間では集熱量の比は大差がないが、その隙

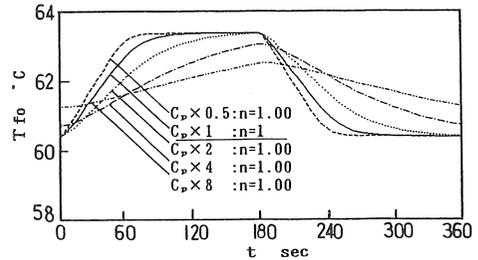


図7 集熱パネルの熱容量の影響

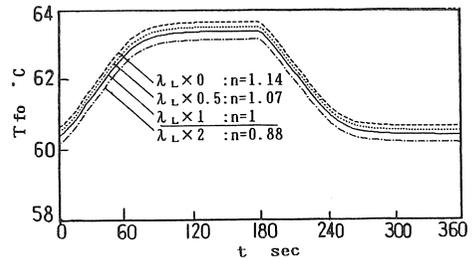


図8 集熱パネル下面断熱材の熱伝導率の影響

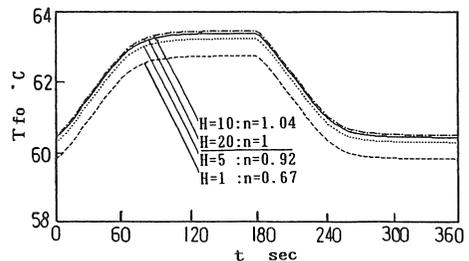


図9 集熱パネルとテフロンフィルムの隙間の影響

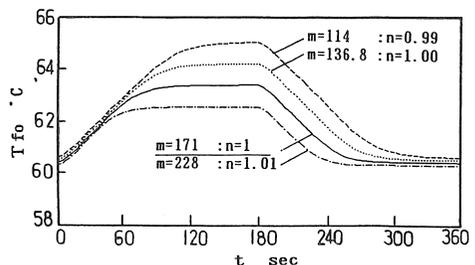


図10 温水流量の影響

間が5mm以下になると集熱量の比は極端に小さくなる。これは以下のように説明される。空気層隙間が小さくなると集熱パネルとテフロンフィルムとの間の空気層の熱伝達率が増大し、テフロンフィルムの温度は上昇する。そして、テフロンフィルムの温度とカバーガラスとの温度差が大きくなり、カバーガラスへの対流および放射伝熱量が増える。なお、伊藤⁽¹⁰⁾は温水の流れを無視した平板形集熱器の定常伝熱解析を行い、上述のことを明らかにしている。

図10は温水流量を変えた場合の計算結果を示す。図中の長破線、短破線、実線および一点鎖線はそれぞれ温水流量 m が 114, 136.8, 171 (= 基本計算) および 228 kg/h の場合を示す。温水流量が少ないほど集熱器出口温水温度は上昇する。一方、この計算範囲では集熱量の比は大差がない。すなわち、熱源としての有用性とポンプ動力の観点から、温水流量は許容される範囲内において、できるだけ小さくした方がよい。

平板形太陽熱集熱器の集熱効率を改善する方法として、光学的な観点からの検討が重要である。例えば集熱パネル表面に選択吸収膜を付与する方法は、選択吸収膜の太陽光吸収率と赤外放射率との差異を利用した光学的な保温手段であり、すでに実用化されている。一方、太陽光はよく透過し、赤外光は反射する選択反射膜(ヒート・ミラー⁽¹²⁾と呼ばれている)を平板形太陽熱集熱器の対流防止用フィルムおよびカバーガラスに適用し、集熱効率を改善することを目的として行われた実験および解析は畠山⁽¹³⁾およびWinegraner⁽¹⁴⁾などの文献に散見する程度であり、十分な検討がなさ

れていない。そこで、これらの材料を本集熱器に適用した場合の集熱特性を予測計算する。

表4は、本計算に用いる集熱パネル用高性能選択吸収膜⁽¹²⁾(Selective(h)と呼ぶ)、オキツモ製B600耐熱放射塗料⁽¹⁵⁾(Black Paintと呼ぶ)、選択反射フィルム⁽¹³⁾(ポリエチレンテレフタレートフィルムの両面にインジウム・錫酸化物Indium-tin oxide=ITO をスパッタリングしたもので、ITO-PET Filmと呼ぶ)および選択反射ガラス⁽¹⁴⁾(透明ガラスの両面にTiO₂/Ag/TiO₂をスパッタリングしたもので、TiO₂-Glassと呼ぶ)の光学的物性値(参考文献^{(12)~(15)}の図表より推測した値)を示す。

表5は本計算の組み合わせを示す。なお、表中のCase1は本集熱器の基本計算条件で、集熱パネル表面の選択吸収膜Selective(s)、対流防止用FEP FilmおよびカバーガラスGlass(s)の光学的物性値は、表3の値を用いる。Case2~Case5は集熱パネル表面を高性能選択吸収膜とした場合およびCase6~Case9は、それを耐熱放射塗料に変えた場合である。

図11はCase1~Case5の場合の計算結果を示す。図中の実線、長破線、短破線、一点鎖線および二点鎖線はCase1, Case2, Case3, Case4およびCase5の場合を示す。集熱パネル表面の選択吸収膜を高機能化したCase2の場合の集熱量の比は1.14である。これは高性能選択

表4 計算に用いる構成材料の光学的物性値

Materials	Sun Shine			Infrared Ray			Ref.
	α_s	τ_s	β_s	ϵ_i	τ_i	β_i	
Selective(h)	0.90	0	0.10	0.10	0	0.90	(12)
Black paint	0.95	0	0.05	0.95	0	0.05	(15)
ITO-PET Film	0.10	0.80	0.10	0.10	0.10	0.80	(13)
TiO ₂ -Glass	0.10	0.80	0.10	0.05	0.05	0.90	(14)

表5 計算の組み合わせ

Case	Panel	Film	Cover Glass
Case1	Selective(s)	FEP Film	Glass(s)
Case2	Selective(h)	FEP Film	Glass(s)
Case3	Selective(h)	ITO-PET	Glass(s)
Case4	Selective(h)	FEP Film	TiO ₂ -Glass
Case5	Selective(h)	ITO-PET	TiO ₂ -Glass
Case6	Black Paint	FEP Film	Glass(s)
Case7	Black Paint	ITO-PET	Glass(s)
Case8	Black Paint	FEP Film	TiO ₂ -Glass
Case9	Black Paint	ITO-PET	TiO ₂ -Glass

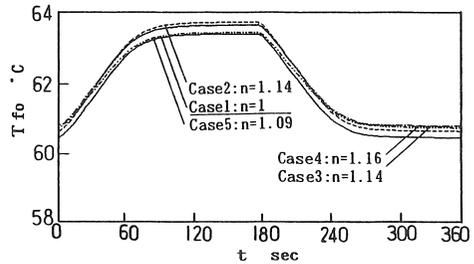


図11 選択反射膜を適用した場合の集熱特性の計算予測 (集熱パネル表面が高性能選択吸収膜の場合)

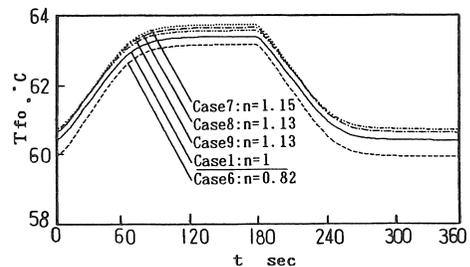


図12 選択反射膜を適用した場合の集熱特性の計算予測 (集熱パネル表面が耐熱放射塗料の場合)

吸収膜の太陽光吸収率および赤外光放射率の改善による効果である。選択反射フィルムを対流防止用フィルムとしたCase3 および選択反射ガラスをカバーガラスとしたCase4の場合の集熱量の比は、それぞれ1.14および1.16である。このことより、高性能選択吸収膜の集熱パネルに、さらに選択反射膜を付与した対流防止用フィルムまたはカバーガラスを併用しても、その効果はほとんど期待できないことがわかる。Case5は選択反射フィルムと選択反射ガラスを併用した場合で、その集熱量の比は1.09である。このことより、高性能選択吸収膜の集熱パネルに選択反射フィルムおよび選択反射ガラスの3者を併用した場合は、太陽光透過率の減少が大きく、集熱効率の向上は望めないことがわかる。

図12はCase6~Case9の場合の計算結果を示す。図中の実線、長破線、短破線、一点鎖線および二点鎖線はCase1, Case6, Case7, Case8およびCase9の場合を示す。集熱パネル表面が耐熱放射塗料のCase6の場合の集熱量の比は0.82である。これは、耐熱放射塗料の赤外光放射率が大きく、集熱パネルからテフロンフィルムおよびカバーガラスへの熱放射量が増加するためである。Case6の耐熱放射塗料の集熱パネルをベースとして、選択反射膜を対流防止用フィルムおよびカバーガラスに適用したCase7およびCase8の場合の集熱量の比はそれぞれ1.15および1.13である。これは耐熱放射塗料面からの赤外光放射を反射する選択反射フィルムおよび選択反射ガラスの効果によるものである。Case9はCase6の集熱パネルに選択反射フィルムおよび選択反射ガラスを併用した場合で、その集熱量の比は1.13である。耐熱放射塗料の集熱パネルに選択反射フィルムおよび選択反射ガラスを併用しても集熱効率の向上は望めないことがわかる。なお、Case7とCase8の集熱量の比がCase7>Case8で、集熱パネルの光学的物性値のみが異なる図11のCase3とCase4の集熱量の比がCase3<Case4と逆の関係となるのは、集熱パネルからの熱損失が、Case7とCase8の場合は各構成要素間の放射伝熱に相対的に強く依存し、Case3とCase4の場合は各構成要素間の対流伝熱に相対的に強く依存していることによるものと考えられる。

4. 結 言

対流防止用のテフロンフィルムが付設された平板形太陽熱集熱器の非定常伝熱計算を行い、日射量などが変化した場合の集熱器構成要素の温度応答および集熱器構成材料の熱的・光学的物性値などが集熱特性に及ぼす影響を検討し、以下の知見を得た。

(1) 日射量がステップ的に変化する場合の集熱パネル水管内温水温度は、日射量の変化とほぼ同時に上昇しはじめ、比較的短時間で定常値に達する。また、温水流量が増すほど温度応答は鋭敏となる。一方、風速がステップ的に変化する場合の集熱パネル水管内温水温度は風速の変化時刻より遅れて上昇しはじめ、定常値に達するまでに長時間を要する。

(2) 日射量が周期的に変化する場合の集熱パネル水管内温水温度は日射量の変化とほぼ同時に変化し、日射量の変化を緩和したプロフィールとなる。一方、カバーガラスと集熱パネル下面断熱材外面の温度は、日射量の周期的変化時刻より遅れて変化し、周期時間幅が短くなるほど1周期ごとの温度変化幅は小さくなる。

(3) 集熱パネルの熱容量は、出口温水温度の応答に大きく影響を及ぼすが、1周期間の集熱量は大差がない。

(4) 集熱パネルと対流防止用フィルムとの空気層隙間は10mm程度がもっとも保温効果がある。ただし、この隙間が5mm以下では集熱量が極端に低下する。

(5) 温水流量は許容範囲において、できるだけ少なくした方がよい。

(6) 集熱パネル表面に高性能選択吸収膜を付与すると集熱効率は改善されるが、高性能選択吸収膜の集熱パネルに、さらに選択反射膜を付与したカバーガラスまたは対流防止用フィルムを併用してもその効果はほとんど期待できない。

(7) 集熱パネル表面に耐熱放射塗料を塗布し、選択反射膜を付与したカバーガラスまたは対流防止用フィルムを併用すると、集熱効率は大幅に改善されるが、その効果は対流防止用フィルムを選択反射膜とした場合の方がより大きい。

終わりに、実験装置の製作と実験に協力を頂いた宮崎県工業試験場の関係者はじめ御支援頂いた皆様に深く感謝します。

文 献

- (1) Klein, S. A., ほか2名, Trans. ASME, Ser. A, 96-2(1974), 109.
- (2) Hahne, E., ほか2名, Solar Energy Int. Progress, 1(1978), Pergamon Press.
- (3) 斎藤・ほか3名, 機論, 48-429, B(昭57), 934.
- (4) 斎藤・ほか4名, 機論, 49-447, B(昭58), 2427.
- (5) 平・ほか3名, 太陽エネルギー, 20-4(1994), 7.
- (6) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改定第3版.
- (7) 日本太陽エネルギー学会, 太陽エネルギーの基礎と応用, オーム社.
- (8) Duffie, J. A., ほか1名, Solar Engineering of Thermal Progress, (1980), John Wiley & Sons.
- (9) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改定第4版.
- (10) 伊藤, 機論, 51-464, B(昭60), 1290.
- (11) 穂積・ほか3名, National Tech. Rept. 27-2(1981), 189.
- (12) Carl M. Lampert(松田 抄訳), 太陽エネルギー, 13-3(1987), 30.
- (13) 昌山, 太陽エネルギー, 6-2(1980), 35.
- (14) R. M. Winegarner, Proc. of ISES American Section and Solar Energy of Canada, 6(1976), 339.
- (15) オキツモ株式会社 技術資料.