

平板形太陽熱集熱系の非定常伝熱特性*

(第1報, 実験ならびに非定常伝熱計算)

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

(1st Report, Experiment and Unsteady Heat Transfer Calculation)

平 茂 蔵^{*1} 小 山 繁^{*2} 浜 崎 和 則^{*3} 藤 井 哲^{*2}
Eizo HIRA Sigeru KOYAMA Kazunori HAMASAKI Tetsu FUJII

Abstract

The characteristics of unsteady heat transfer for a solar collector system which is composed of two flat-plate solar collectors and three joint pipes are studied experimentally and numerically. The experiment is carried out under outdoor conditions. The collector efficiency is calculated using the HWB model called by Klein et al. The deviation of collector efficiency from the average value is within $\pm 10\%$. The numerical calculation for unsteady heat transfer of this system is also carried out under the same condition as experimental one. The calculated values of the water temperature at the outlet of this system agree well with the measured ones. It is demonstrated that unsteady heat transfer calculation is required to predict the collector efficiency more exactly.

Key words : Solar Energy, Flat-Plate Solar Collector, Unsteady State, Collector Efficiency, Numerical Calculation

1. 緒 言

強制循環方式の平板形太陽熱集熱系の伝熱特性に関する研究は、すでに数多くなされている。例えば、種村や山東ら^{(1)~(3)}の定常状態での集熱効率の測定法と配管熱損失に関する詳細な研究、Kleinら⁽⁴⁾およびHahneら⁽⁵⁾の集熱器の構成要素を複数の集中熱容量に分割した数学的モデルによる解析、斎藤ら^{(6), (7)}の赤外線ランプ群による周期日射条件下の過渡特性に関する詳細な研究、笛口ら⁽⁸⁾のハニカム形集熱器の伝熱特性に関する実験と解析、伊藤⁽⁹⁾のテフロンフィルムによる対流防止効果の解析、田中ら⁽¹⁰⁾の接続配管系の非定常熱損失に関する実験と解析などがある。しかしながら、本研究で対象としている接続配管系を含めた平板形集熱系に対して、日射、風速および気温

が変化する場合の、いわゆる通常の屋外使用条件下で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。

本報では、通常の屋外使用条件下における平板形太陽熱集熱系の非定常伝熱特性を検討するために、対流防止用の薄い透明テフロンフィルムが付設された平板形太陽熱集熱器2セットを直列に配管接続した実験装置を製作し、日射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平板形集熱系全体の非定常熱移動に関する数値計算を行い、その結果と実測値との比較を行った。

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/s
B : y 方向の断面積	m^2
C : y 方向の単位長さあたりの熱容量	$(kJ/K)/m$
c : 接続配管、集熱器構成要素の比熱	$kJ/(kg \cdot K)$
c_f : 温水の定圧比熱	$kJ/(kg \cdot K)$

* 原稿受付 平成5年11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)

d : 接続配管内径, 集熱パネル水管水力直径	m	○ : 出口または外面
Gr : グラスホフ数	-	p : 集熱パネル
h : 热伝達率	$W/(m^2 \cdot K)$	pk : 集熱パネルとテフロンフィルムの間
I : 日射量	W/m^2	
I_d, \bar{I}_d : 日射量変動値(式(1))および I_d の平均値	%	
i : 実験データの読み取り番号		
L : 集熱パネル下面断熱材の厚み方向の座標	m	
m : 温水流量	kg/h	
N : 出現個数およびデータ数		
Nu : ヌセルト数		
n : 実験データの読み取り個数($n=21$)		
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	
r : 接続配管の半径方向の座標	m	
S : y 方向の単位長さあたりの表面積	m^2/m	
T : 温度	$^\circ C, K$	
T^* : $T^* = (T_{fm} - T_a) / I$	$m^2 \cdot K/W$	
T_{fm} : $T_{fm} = (T_{fi} + T_{fo}) / 2$	$^\circ C$	
T _{sky} : 天空の温度	K	
t : 時間	$h, min., sec.$	
w, \bar{w} : 風速(10min.間平均値)およびwの平均値	m/s	
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($i=1 \sim 3, j=1 \sim 4$)	-	
Δt : 計算時間幅	sec.	
ε_i : 赤外光放射率	-	
η_{exp} : 集熱効率 = $100 \times c_{fm} (T_{fo} - T_{fi}) / F_p I$	%	
η_{st} : 数値計算による定常集熱効率	%	
η_{unst} : 数値計算による非定常集熱効率	%	
λ : 接続配管, 集熱器構成要素の熱伝導率	$W/(m \cdot K)$	
ρ : 接続配管, 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	-	
添字		
a : 周囲		
f : 温水		
fi : 集熱系入口(=接続配管(1)入口)の温水		
fj : 接続配管内の温水		
fo : 集熱系出口(=接続配管(3)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 : 入口または内面		
j : 接続配管		
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		

2. 実験装置および方法

図1(a), (b), (c)および(d)は、それぞれ実験装置の系統図、平板形太陽熱集熱器の配置図、接続配管の形状・寸法および平板形太陽熱集熱器の詳細図を示す。本実験装置は宮崎県工業試験場本館(3階建)屋上に設置した。なお、本実験装置では本報の平板形太陽熱集熱系のほかに真空断熱形太陽熱集熱系もほぼ同時期に実験したが、その結果は次報で報告する。

図1(a)に示すように、温水は内容積0.3m³の蓄熱タンクから循環ポンプ、流量計(オーバル製、LS5277型)を通過し、平板形太陽熱集熱系に供給される。蓄熱タンク内温水温度は5kWの電気ヒータ管と空気式放熱器を用いて、設定温度±0.3°C以内で制御した。集熱器周囲風速は集熱器より約10m離れた位置において風向計(高さ約1.2m)の上に固定した積算型風程風速計(中浅測器製、A-21型)を用いて測定した。日射量の測定は集熱器台架に置いた全天日射計(英弘精機製、MS-42型)により測定した。

一方、集熱器は高さ2.5mの台架上に、水平に2セット直列に配置した(図1(b)参照)。集熱系入口温水温度測定位置(T_{fi})と集熱器(1)の間の接続配管(1)、集熱器(1)と集熱器(2)の間の接続配管(2)および集熱器(2)と集熱系出口温水温度測定位置(T_{fo})の間の接続配管(3)は、それぞれ約3.5m、約2.8mおよび約3.5mの長さで、それらは内径13mm、外径27mmの耐熱性ゴム管である。それは図1(c)に示すように、内層($r=6.5 \sim 9.5\text{ mm}$)、補強層($r=9.5 \sim 12.5\text{ mm}$)、外層($r=12.5 \sim 13.5\text{ mm}$)の3層のゴムにより構成されている。ただし、これらの接続配管外表面は保温していない。集熱系入口出口温水温度はT_{fi}およびT_{fo}位置の接続管内中央に挿入したシース外径0.65mmのT型熱電対により、また集熱器周囲の外気温度は集熱器(1)の下方約0.5mの日陰の位置においてシース外径0.65mmのK型熱電対により測定した。なお、熱電対の熱起電力は冷却式基準接点温度補償器(チノ-製、KTE-06型、 $0 \pm 0.3^\circ C$)を介してペンレコーダで記録した。

供試太陽熱集熱器は松下電器産業製SI-70N型試作器で、本集熱器のカバーガラスと集熱パネルの中間に、内部空気層の対流防止を目的とした厚み25μmの透明テフロンフィルム(FEP Film)が張ってある(図1(d)参照)。集熱パネルは、厚み0.4mmのステンレス薄板を2枚

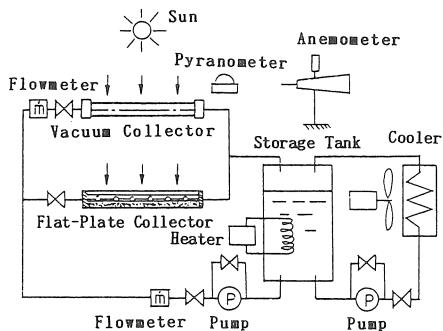


図 1 (a) 実験装置の系統図

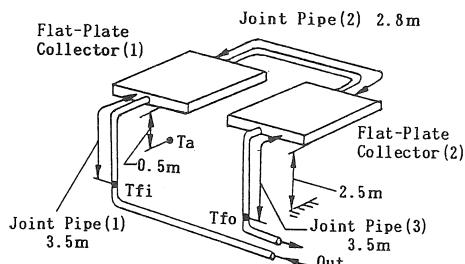


図1(b) 平板形太陽熱集熱器の配置図

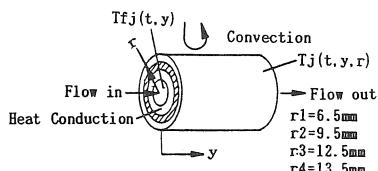


図 1 (c) 接続配管の形状・寸法

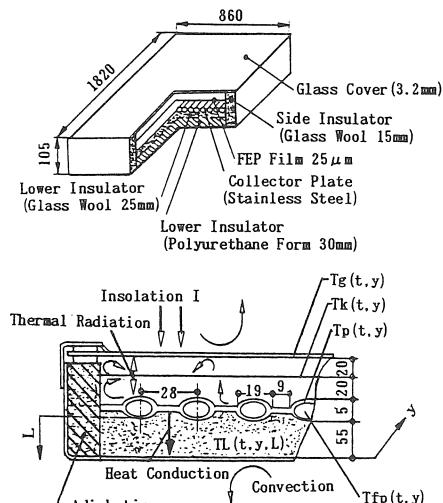


図 1 (d) 平板形太陽熱集熱器の詳細図

重ねたチューブインシート型で、水管部が19mm、フィン部が9mmの1ピッチ28mm、27列である。集熱パネルの表面には選択吸収膜が付与してある。

実験は、温水流量mを114~228kg/h(温水の集熱系通過時間で90~180sec.)の範囲で4段階、集熱系入口温水温度T_{fi}を40~80°Cの範囲で5段階に設定して行った。実験期間は昭和56年9月から昭和57年2月までの約6ヶ月間で、実験は雨や曇の日を除いた、通常使用状態の日に行った。また、集熱系の放熱特性を調べるために、晴れた日の夜に夜間放熱実験も併せて行った。

本実験では、日射変動や集熱器周囲の風速などが集熱効率に及ぼす影響を調べるために、日射量や温度データの読み取りを30sec.ごとに行い、10min.ごとに集熱効率や日射量変動値などを計算した。なお、本報では日射量変動値の定義を式(1)とし、実験期間中の日射データを整理した。

$$I_d = 100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| I_i - I_m \right| / I_m \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、 I_d は日射量変動値(%)、 n は10min.間のデータの個数で $n=21$ 、 I_i は*i*番目の読み取り日射量(W/m^2) I_m は10min.間の平均日射量(W/m^2)である。一方、集熱器周囲の風速は、積算型風程風速計を5min.ごとに読み取り、10min.ごとに平均した。

3. 集熱実験結果

図2は日射量変動値 I_d (%)の出現個数を示す。横軸は日射量変動値の区分幅で、縦軸はその出現個数Nである。実験期間中の全データ(N=312)の日射量変動値の平均値 \bar{I}_d は7.5%であった。

図3は風速(m/s)の出現個数を示す。横軸は風速の区分幅で、縦軸はその出現個数Nである。実験期間中の全データ(N=312)の平均風速 \bar{w} は2.6m/sであった。

図4は、図2および3の日射量変動値や風速などの条件下における屋外集熱実験の結果である。横軸は T^* = $(T_{fm} - T_a) / I$ で、縦軸は集熱効率 η_{exp} を示す。ここに、本表示法は定常状態における太陽熱集熱器の集熱効率の表示法として一般に用いられているもので、Kleinら⁽⁴⁾はHWBモデルと名付けている。集熱効率は集熱効率が負の値、すなわち集熱量よりも放熱量が大きい範囲における実験値も含めて、右下がりである。また、 T^* が増加すると集熱効率の変動幅は大きくなる。この変動の原因は、入口温水温度、日射量、風速および外気温度などが異なるデータを HWBモデルに適用して計算した場合に生じる集熱効率の相違に加えて、

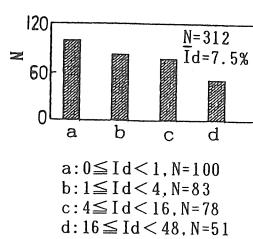


図2 日射量変動値 Id (%) の出現個数 N

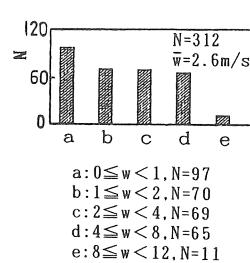


図3 風速 w (m/s) の出現個数 N

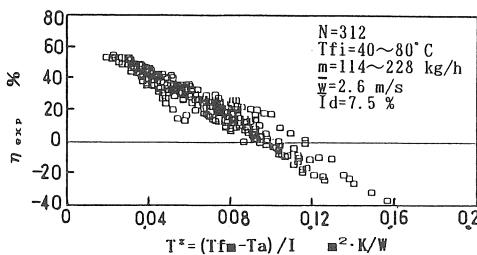


図4 屋外集熱実験結果

温水流れの時間的遅れや集熱系構成材料の蓄熱効果などのため、日射および風速などの変化と出口温水温度の時間的变化が一致していないことによるものと考えられる。

4. 非定常伝熱計算の基礎式および方法

図1(c)および(d)の接続配管形状寸法および集熱器詳細図にもとづき、本集熱系全体の非定常伝熱計算を行ふ。その際、以下の仮定をおく。

- (1) 接続配管に用いた耐熱性ゴム管は3層構造であるが、単一層とする。
- (2) 接続配管内温水の温度は混合平均温度で代表する。また、接続配管内温水や配管外表面の熱伝達率は表1の経験式が適用できるものとする。
- (3) 接続配管の温水流れ方向の材料内熱伝導は無視する。また、配管外表面への日射や接続部での熱損失も無視する。
- (4) 集熱パネル下面の断熱材はグラスウールと発泡ウレタンの2層構造であるが、ここではグラスウールの1層構造とし、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とする。さらに、集熱パネル、テフロンフィルムおよびカバーガラスの表面積は等しいとし、集熱パネルの表面積で代表する。

表1 計算に用いる熱伝達式

For Inside of Joint Pipe (h_{fp})	Gnielinski ⁽¹¹⁾ $Nu = \frac{(f/2) \cdot (Re-1000) \cdot Pr}{1+12.7 \cdot (f/2)^{0.5} \cdot (Pr^{2/3}-1)}$ $f=0.079/Re^{0.25}$ $(3000 < Re < 10^6, 0.5 < Pr < 2000)$
For Outside of Joint Pipe (h_j)	Zukauskas ⁽¹¹⁾ $Nu=C_1 \cdot Re^n \cdot Pr^{0.37} (Pr/Pr_w)^{0.25}$ $Re \quad C_1 \quad n$ $1 \sim 40 \quad 0.75 \quad 0.4$ $40 \sim 1 \times 10^3 \quad 0.51 \quad 0.5$ $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5 \quad 0.26 \quad 0.6$
For Inside of Collector Panel Pipe (h_{fp_p})	Hausen ⁽¹²⁾ $Nu=3.66 + \frac{0.0668 \cdot (d/L) \cdot Re \cdot Pr}{1+0.04((d/L) \cdot Re \cdot Pr)^{2/3}}$
Between Panel and Film (h_{pk})	Silveston ⁽¹³⁾ $Nu=1 \quad Ra \leq 1700$ $Nu=0.027 \cdot Ra^{1/2} \quad 1700 < Ra \leq 6000$
Between Film and CoverGlass (h_{kg})	$Nu=0.37 \cdot Ra^{1/5} \quad 6000 < Ra \leq 30000$ $Nu=0.09 \cdot Ra^{1/3} \quad 30000 < Ra$ $(Ra=Gr \cdot Pr)$
Between Collector Casing and Ta (h_a)	Duffie ⁽¹⁴⁾ $h_a=5.7+3.8w \quad W/(m^2 \cdot K)$

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.
Joint Pipe	1450	1.8	0.205	(11)
Collect. Panel	7890	0.511	16.5	
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特性値

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	(9)
Cover Glass	0.05	0.88	0.07	0.90	0.05	0.05	(15)
PEP Film 25 μm	0.02	0.90	0.08	0.45	0.50	0.05	

- (5) 集熱パネル水管内の温水温度も接続配管と同じく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、水管内温水や集熱パネル表面の空気の熱伝達率は表1の経験式が適用できるものとする。
- (6) カバーガラスと集熱パネルおよびテフロンフィルム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、カバーガラスと集熱パネルの温水流れ方向の材料内熱伝導は考慮するが、集熱パネル下面断熱材およびテフロンフィルムについては、温水流れ方向の熱伝導は無視する。
- (7) テフロンフィルムの熱容量はカバーガラスや集熱パネルのそれに比べて1/1000オーダーであるので、テフロンフィルムの熱容量は無視する。
- (8) 天空の温度は外気温度よりも15°C低い⁽⁹⁾ものとする。また、集熱器支持台等からの熱損失は無視する。
- (9) 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。温水や空気の熱物性値は文献⁽¹¹⁾のデータを温度の2次式に近似して用いる。

4・1 基礎式

接続配管内温水の熱バランスとその境界条件：

$$C_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} = A_{f1} h_{f1} (T_s - T_{f1}) + c_{f1} m_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial y} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$y = y_1 : T_{f1} = T_{f1} \quad \dots \dots \dots (3)$$

接続配管材料の非定常熱伝導式とその境界条件：

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = a_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$r = r_1 : \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r} = h_{f1} (T_f - T_{f1}) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$r = r_o : \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r} = h_o (T_f - T_s) \quad \dots \dots \dots (6)$$

集熱パネル水管内温水の熱バランスとその境界条件：

$$C_{fp} \frac{\partial T_{fp}}{\partial t} = A_{fp} h_{fp} (T_s - T_{fp}) + c_{fp} m_{fp} \frac{\partial T_{fp}}{\partial y} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$y = y_1 : T_{fp} = T_{f1} \quad \dots \dots \dots (8)$$

集熱パネルの熱バランスとその境界条件：

$$C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = B_p \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + Q_p + S_p h_{pk} (T_k - T_p) \\ + A_p h_{fp} (T_{fp} - T_p) + S_p \lambda_p \frac{\partial T_L}{\partial L} \Big|_{L=L_1} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$y = y_1, y = y_o : \frac{\partial T_p}{\partial y} = 0 \quad \dots \dots \dots (10)$$

テフロンフィルムの熱バランス：

$$Q_k + S_p h_{pk} (T_p - T_k) + S_p h_{ks} (T_s - T_k) = 0 \quad \dots \dots \dots (11)$$

カバーガラスの熱バランスとその境界条件：

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = B_g \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} + Q_g + S_g h_{kg} (T_s - T_g) \\ + S_g h_{ks} (T_k - T_g) \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$y = y_1, y = y_o : \frac{\partial T_g}{\partial y} = 0 \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここに、式(9)、(11)および(12)中の光学的受熱量 Q_p 、 Q_k および Q_g は式(14)、(15)および(16)である。なお、光学的係数 $\gamma_{11} \sim \gamma_{14}$ 、 $\gamma_{21} \sim \gamma_{24}$ 、 $\gamma_{31} \sim \gamma_{34}$ は、伊藤⁽⁹⁾が与えた多重反射の計算式より得られた数値を用いる。

$$Q_p = S_p (\gamma_{11} I + \gamma_{12} (T_{s1} - T_{p1}) + \gamma_{13} (T_{s2} - T_{p2}) + \gamma_{14} (T_{s3} - T_{p3})) \quad (14)$$

$$Q_k = S_p (\gamma_{21} I + \gamma_{22} (T_{p1} - T_{k1}) + \gamma_{23} (T_{s2} - T_{k2}) + \gamma_{24} (T_{s3} - T_{k3})) \quad (15)$$

$$Q_g = S_g (\gamma_{31} I + \gamma_{32} (T_{p1} - T_{g1}) + \gamma_{33} (T_{s2} - T_{g2}) + \gamma_{34} (T_{s3} - T_{g3})) \quad (16)$$

集熱パネル下面断熱材の非定常熱伝導式とその境界条件：

$$\frac{\partial T_L}{\partial t} = a_L \frac{\partial^2 T_L}{\partial L^2} \quad \dots \dots \dots (17)$$

$$L = L_1 : T_L = T_p \quad \dots \dots \dots (18)$$

$$L = L_o : \lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial L} = h_o (T_s - T_L) \quad \dots \dots \dots (19)$$

基礎式全体の初期条件：

$$t \leq 0 : T_f, T_p, T_k, T_s, T_L = T_s \quad \dots \dots \dots (20)$$

温水流れの接続条件は、接続配管(1)、(2)および(3)と集熱器(1)および(2)において、それぞれ対応した出口および入口温水温度を等しいとおく。

4・2 計算方法

接続配管系については式(2)、(4)を式(3)、(5)、(6)、(20)の条件により、また、集熱器については式(7)、(9)、(11)、(12)、(17)を式(8)、(10)、(13)、(14)～(16)、(18)、(19)、(20)の条件により数値計算した。テフロンフィルムの温度は式(11)を、ニュートン・ラブソン法により反復計算して求めた。その際、計算値の前後の温度差が、0.0001°C未満のとき収束とみなした。他の要素の温度は基礎式を前進差分近似して求めた。計算時間幅(Δt)は温水流れの時間や計算精度を考慮して、0.5sec.に固定した。構成要素の分割数は解の安定条件⁽¹⁶⁾を満たすように選んだ。具体的には、接続配管は半径方向に7分割、集熱パネル下面断熱材は厚み方向に10～20分割した。また、温水流れ方向の分割数は、接続配管(1)、(3)は15～30、接続配管(2)は12～24、集熱器を構成するカバーガラス、集熱パネル、テフロンフィルムおよび下面断熱材はいずれも72～144である。

5. 非定常伝熱計算と実験値との比較

5・1 夜間放熱実験の場合

日射がない場合の本伝熱計算の妥当性を検証するた

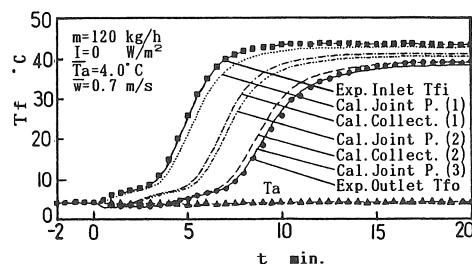


図5 夜間放熱実験値と計算値の比較
(m=120kg/hの場合)

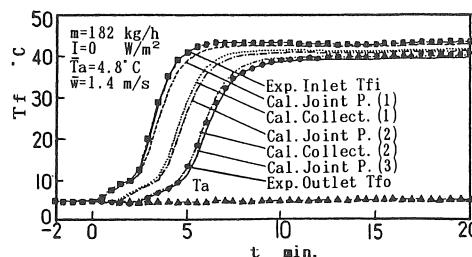


図6 夜間放熱実験値と計算値の比較
(m=182kg/hの場合)

めに、晴れの日の夜に本集熱系に対して異なる流量の温水をステップ的に供給した場合の実験を行った。そして集熱系入口および出口の温水温度の実測値と本伝熱計算により求めた各接続配管および集熱器出口の温水温度の時間的变化を比較する。

図5は、時刻 $t=0\text{min}$.より温水流量 m を 0kg/h から 120kg/h (温水の集熱系通過時間で約171sec.) にステップ的に变化させた場合の各位置の温水の温度経過を示す。横軸は経過時間 t で、縦軸は温水温度 T_f である。図中の■、●および▲印はそれぞれ集熱系入口(=接続配管(1)の入口)の温水温度 T_{fi} 、集熱系出口(=接続配管(3)の出口)の温水温度 T_{fo} および外気温度 T_a の実測値を示す。一方、図中の短破線、一点鎖線、二点鎖線、長破線および実線はそれぞれ実験と同一の温水流量 m 、外気温度 T_a 、風速 w および集熱系入口温水温度 T_{fi} を与えた場合の接続配管(1)、集熱器(1)、接続配管(2)、集熱器(2)および接続配管(3)の出口温水温度の計算結果を示す。集熱系入口温水温度の実測値は最初おだやかに上昇する。そして、 $t=3\text{min}$.より急に上昇はじめ、 $t=12\text{min}$.で平衡に達する。ここに、集熱系入口温水温度がステップ的に立ち上がらないのは、温度の測定位置と蓄熱タンクの距離が約15m離れていることによる。集熱系出口温水温度の実測値は集熱系入口温水温度より約180sec. 遅れて上昇はじめ、その後集熱系入口温水の温度上昇の傾きを緩和した形のプロフィールとなり、 $t=18\text{min}$.で平衡に達する。各位置の温水温度の計算値も、集熱系入口温水温度の時間的变化を緩和したようなプロフィールを描いて推移し、平衡に達する。接続配管(3)の出口温水温度の計算値(実線)はその位置の実測値 T_{fo} (●印)とよく一致している。

図6は、温水流量が 182kg/h (温水の集熱系通過時間で約113sec.)の場合の結果を示す。図中の記号と線群の意味は図5の場合と同じである。図6と図5を比較すると、集熱系入口温水温度 T_{fi} (■) および集熱系出口温水温度 T_{fo} (●印) の上昇は図6の方が早い。これは温水流量が約1.5倍に増加し、集熱系を通過する時間が短くなったためである。しかし、それらの温度プロフィールは図5の場合とほぼ相似である。実験条件を与えて得られたそれぞれの位置の温水温度の計算値も図5と同様な傾向で時間的に推移する。そして、接続配管(3)の出口温水温度の計算値(実線)は、その位置の実測値 T_{fo} (●印) とよく一致している。

5・2 日射変動条件下の集熱実験の場合

日射が変動している場合の本伝熱計算の妥当性を検証するために日射変動条件下の集熱実験を行った。そ

して、実測温水温度と、その実験条件の変動日射量、温水流量、外気温度、風速および集熱系入口温水温度を与えた場合の計算結果とを比較する。

図7は実測日射量であり、集熱系出口温水温度の測定時刻より 10min . 前からのデータを示す。横軸は経過時間 t で、縦軸は日射量 I である。ここで、 $t=0\sim 10\text{min}$. および $t=10\sim 20\text{min}$. 区間の 30sec .ごとの読み取り値の和とアナログ積分器(英弘精機製、MP-20型)の積算値の比(アナログ積分器の積算値を分母とする)は、 $t=0\sim 10\text{min}$.の区間で0.99、 $t=10\sim 20\text{min}$.の区間で1.00

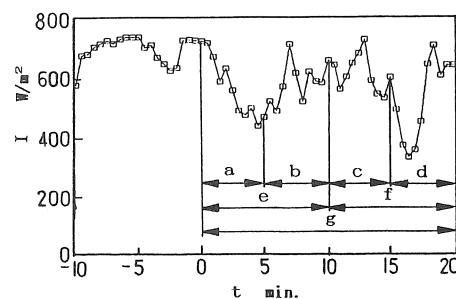


図7 実測日射量および日射区分

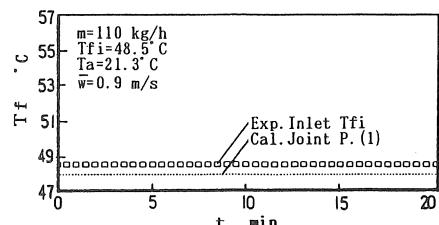


図8 (a) 集熱系入口と接続配管(1)の出口温水温度

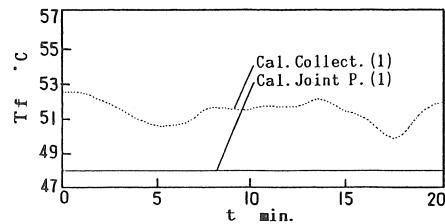


図8 (b) 接続配管(1)と集熱器(1)の出口温水温度

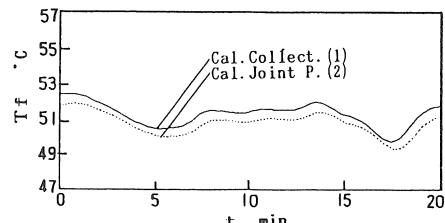


図8 (c) 集熱器(1)と接続配管(2)の出口温水温度

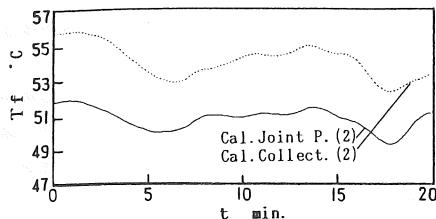


図 8 (d) 接続配管(2)と集熱器(2)の出口温水温度

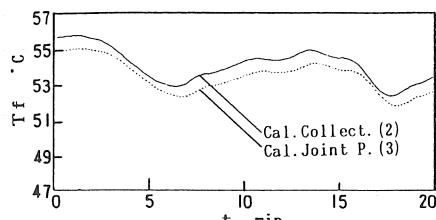


図 8 (e) 集熱器(2)と接続配管(3)の出口温水温度

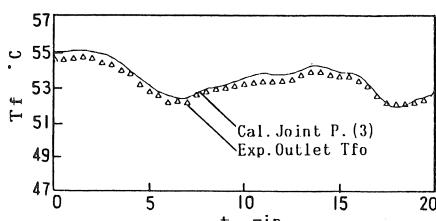


図 8 (f) 接続配管(3)と集熱系の出口温水温度

であり、日射量の測定手法が適切であることを確認した。なお、本伝熱計算は、集熱系の全体が定常状態に達するまで $t = -10\text{min}$. の日射量を入力した後、図 7 の $t = -10\text{min}$. から 20min . 区間の日射量を入力して行った。ただし、 $t = -10 \sim 0\text{min}$. 区間の結果は、それ以前の計算の影響を受けるので、以下の検討には用いなかった。

図 8 (a)～(f) は、温水流量が $110\text{kg}/\text{h}$ (温水の集熱系通過時間で約 187sec) で、日射量が変動している場合の集熱系の温水温度の実測値と計算値を示す。横軸は経過時間 t で、縦軸は温水温度 T_f である。□印と△印は集熱系入口と出口温水温度の実測値を、実線と短破線はそれぞれ温水入側と出側の計算値を示す。

図 8 (a) は集熱系入口 (=接続配管(1)の入口) 温水温度の実測値 T_{fi} (□印) と接続配管(1)の出口温水温度の計算値を示す。接続配管(1)の出口温水温度は低下している。これは、接続配管(1)表面からの放熱により、接続配管(1)内の温水が冷却されることを示している。

図 8 (b) は接続配管(1)と集熱器(1)の出口温水温度の計算値を示す。集熱器(1)の入口温度がほぼ一定であるので、集熱器(1)の出口温水温度は日射量のプロフィールを緩和したような時間的変化を示している。

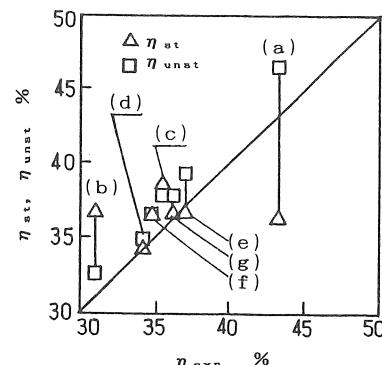


図 9 平均日射量と変動日射量を与えた場合の集熱効率の計算比較

図 8 (c) は集熱器(1)と接続配管(2)の出口温水温度の計算値を示す。接続配管(2)表面からの放熱と温水流れの時間的遅れ(12秒)により温度プロフィールがずれる。

図 8 (d) は接続配管(2)と集熱器(2)の出口温水温度の計算値を示す。集熱器(2)の出口温度プロフィールは入口温水の温度変化に日射の変動が重ねられ、温度の高低が強調されている。

図 8 (e) は集熱器(2)と接続配管(3)の出口温水温度の計算値を示す。図 8 (c) の場合と同様に接続配管表面からの放熱と温水流れの時間的遅れ(15秒)により温度プロフィールがずれる。

図 8 (f) は接続配管(3)の出口(=集熱系出口)の温水温度の実測値 T_{fo} (△印) と計算値(実線)を示す。両者はよく一致している。なお、計算値が実測値よりやや高い温度を予測するのは、伝熱計算式を導入する際に集熱器の側面を断熱として扱うなど、一部の放熱損失を無視していることによると考えられる。

5・3 集熱効率

日射が変動する場合の集熱効率の算定誤差を、定常日射状態を想定した集熱効率の計算値と、変動日射状態の集熱効率の計算値および実測値により検討する。まず、図 7 の実測日射量を一定時間ごとに区切り、それぞれの区間の平均日射量を一定値として与えた場合の定常伝熱計算を行う。そして、集熱系出口温水温度の計算値より集熱効率(定常集熱効率 η_{st} と呼ぶ)を求める。次に、5・2 の場合と同様に変動日射量を与えた場合の非定常伝熱計算を行う。そして、図 7 の対象区間ごとの出口温水温度の平均値を求め、それを用いて集熱効率(非定常集熱効率 η_{unst} と呼ぶ)を算出する。さらに、それぞれの区間の実測出口温水温度の平均値より集熱効率 η_{exp} を求める。

図9は、図7の日射区間ごとの集熱効率の関係を示す。横軸は実測集熱効率 η_{exp} 、縦軸は定常集熱効率 η_{st} (△印)および非定常集熱効率 η_{unst} (□印)である。また、同一日射区間の η_{st} (△印)と η_{unst} (□印)を縦実線で結び、その差異を示す。図中の(a)～(g)は、それぞれ図7に記入した日射区間に対応している。

η_{st} と η_{exp} との差異は、日射量が減少する(a)区間では-7.1%、日射量が増加する(b)区間では+5.4%であるが、日射変動が少ない(c)区間および日射量が同程度で増減する(d)区間では小さい。また、日射区間を10min., 20min.と拡大すると、 η_{st} と η_{exp} との差異は小さくなる。すなわち、日射区間が短く、かつその区間で日射量が単調に減少または増加する場合では、対象とした日射区間より前の時刻に蓄熱または放熱された熱量が大きく影響するため、集熱系の蓄熱効果を無視した η_{st} の誤差は大きい。しかし、日射区間が短くても日射量が上下に変動する場合、あるいは日射区間を拡大すると、集熱系の蓄熱の影響が相対的に減少し、加えて集熱系を構成する伝熱要素の温度の増減が相殺されるために、 η_{st} と η_{exp} の誤差は小さい。

一方、 η_{unst} と η_{exp} とは日射区間(a)～(g)とほぼ無関係に $\eta_{unst} > \eta_{exp}$ で、差は+0.3%～+3.3%の範囲にある。なお、この差異は図8(f)で説明したように、集熱器側面などの放熱損失を一部無視していることによると考えられる。以上より、日射量が変動する場合の集熱効率を日射量の増減量や時間幅に無関係に、より正確に予測するには、集熱系の非定常伝熱の計算を行う必要がある。

6. 結 言

接続配管系を含む平板形太陽熱集熱系について、日射量などが変化している場合の集熱実験を行った。また、本集熱系全体に関する非定常の伝熱計算を行い、その結果を実測値と比較した。

(1) 日射や風速が変化している通常使用条件下の集熱効率を定常状態の表示法に適用し整理したところ、同

一の T^* に対して集熱効率の変動幅は平均値から±10%程度であった。

(2) 本集熱系全体の非定常伝熱に関する計算結果が実験結果とよく一致することを、日射がない条件で温水流量を変えた場合および日射が変動している場合について確認した。

(3) 日射が変動する場合の集熱効率の算定誤差を定常日射状態を想定した計算値 η_{st} と、変動日射状態の計算値 η_{unst} および実測値 η_{exp} の3者により比較検討した。日射区間が短く、かつ日射量が単調に増加または減少する区間では、 η_{st} と η_{exp} との差異が大きくなり集熱効率を正しく予測できないが、日射区間を20min.程度に拡大すると、集熱系の蓄熱および温水流れの時間的遅れなどの影響が相対的に減少して、 η_{st} と η_{exp} との差異は小さくなることから、日射量が変動する場合でも概略の集熱効率を η_{st} で予測できることを示した。一方、日射量が変動する場合の集熱効率を日射量の増減量や時間幅に無関係に、より正確に予測するには、集熱系全体の非定常伝熱計算を行う必要があることを示した。

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) 種村・山東、名古屋工業技術試験所報告、26-4(1977), 91.
- (2) 山東・ほか3名、空気調和・衛生工学論文集、17(1981), 41.
- (3) 種村・ほか3名、名古屋工業技術試験所報告、30-6・7(1981), 174.
- (4) Klein, S.A., ほか2名、Trans. ASME, Ser. A, 96-2 (1974), 109.
- (5) Hahne, E., ほか2名、Solar Energy Int. Progress, 1(1978), Pergamon Press.
- (6) 斎藤・ほか3名、機論、48-429, B(昭57), 934.
- (7) 斎藤・ほか4名、機論、49-447, B(昭58), 2427.
- (8) 笹口・ほか3名、機論、51-461, B(昭60), 205.
- (9) 伊藤、機論、51-464, B(昭60), 1290.
- (10) 田中・ほか3名、機論、57-536, B(1991), 1442.
- (11) 日本機械学会、伝熱工学資料、改定第4版。
- (12) 日本機械学会、伝熱工学資料、改定第3版。
- (13) 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。
- (14) Duffie, J.A., ほか1名、Solar Engineering of Thermal Progress, (1980), John Wiley & Sons.
- (15) 梶積・ほか3名、National Tech. Rept. 27-2(1981), 189.
- (16) 片山・斎藤、例えば、機論、38-306(昭47), 388.