

# 太陽光／熱 (PV/T) ハイブリッドコレクタにおける 熱回路網法による伝熱計算

坂口 勝次\*

Heat Transfer Calculations by Thermal Network Method  
in a Solar Photovoltaic/Thermal (PV/T) Hybrid Collector

Katsuji SAKAGUCHI\*

## ABSTRACT

In this study, a steady one-dimensional heat transfer calculations for a PV / T (solar photovoltaic-thermal) hybrid collector, which consisted of a photovoltaic module and a thermal collector with the straight water tubes under the condition of the forced convection, were performed by using the thermal network method to estimate the cell temperature and the outlet water temperature from the collector. Solar radiation intensity, water flow rate and wind speed were changed respectively. As a result, it was confirmed that the cell temperature and the outlet water temperature decreased with the increase of the water flow rate and the wind speed and increased with the increase of the solar radiation intensity. Also, it was found that when the water flow rate increased under the constant solar radiation intensity, the solar energy utilization efficiency was improved because the solar photovoltaic efficiency was kept to being almost constant and the thermal collection efficiency was increased.

キーワード：ハイブリッドコレクタ，太陽電池モジュール，集熱器，熱回路網，伝熱計算。

**Keywords :** Hybrid collector, Photovoltaic module, Thermal collector, Thermal network, Heat transfer calculation.

## 1. まえがき

地球温暖化対策としての脱炭素社会への移行の観点から、再生可能エネルギー技術の進展と普及・拡大は重要である。

自然エネルギーの中で太陽エネルギーは、クリーンで無尽蔵であり、古くから利用されてきた。太陽エネルギー利用技術の進展と普及を推進するためには、さらなるエネルギー利用効率の向上と導入コストの削減が求められる。

太陽エネルギー利用技術の中で普及が進んでいる太陽光発電では、太陽電池モジュール（以下、「モジュール」と呼ぶ）の太陽電池セル（以下、「セル」と呼ぶ）の変換効率は市販する単結晶シリコン太陽電池で15～20%程度[1]であり、セルの温度上昇とともに変換効率が低下する特性を有する[2-5]。

太陽エネルギー利用効率の向上を図る太陽光発電と太陽熱利用を併用するハイブリッドシステムに関する報告[6-8]がある。ハイブリッドシステムの中核となるハイブリッドコレクタ（以下、「PV/T コレクタ」と呼ぶ）の基本原理は、コレクタ（集熱器）とモジュールを組み合わせてモジュールへの日射熱をコレクタで集熱することによって、モジュールの過度な温度上昇によるセルの変換効率の低下を抑制するとともに回収した熱を給湯等に利用するものである[8]。

著者は、汎用モジュールについて熱回路網法を用いた伝熱計算によるセル温度の推定を行い、その推定値の妥当性を示した[9]。本研究では、太陽光発電／太陽熱利用ハイブリッドシステムの設計指標の構築を視野に入れ、熱回路網法を用いてPV/T コレクタにおける伝熱計算を試みた。

---

\*機械システム工学科

## 2. 伝熱計算

### 2.1 PV/T コレクタ

本研究で扱う PV/T コレクタは強制対流による水集熱直管式であり、コストを考慮して汎用モジュールを用い、図1のイメージで示すようなモジュール裏面に厚手のバックシートと断熱材を重ね、直管形の集熱管をバックシートと断熱材で挟んで覆う構造とした。

本研究の伝熱計算では、汎用モジュールにおけるセル温度の推定[9]と同様の熱回路網法を本研究の PV/T コレクタに適用し、定常一次元伝熱モデルとして取り扱った。すなわち、図2に示すように、PV/T コレクタは、①カバーガラス、②封止材、③セル、④バックシート、⑤集熱管壁、⑥断熱材で構成され、⑤集熱管内には水が流れている。各構成部材の諸元について、モジュール部分は文献[10]等を参考にして、表1に示すように設定した。ここで、③セルは、厚さ $2\delta_s$ の封止材で充填されて包まれており、他の構成部材に比べて厚さが極めて薄いため、セル内部の熱伝導を無視し、セルを黒体として扱った。

表1 PV/T コレクタ構成部材の諸元

	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/(m·K)]	放射率 [-]	反射率 [-]
カバーガラス	$\delta_g = 3.2$	$\lambda_g = 1.0$	$\varepsilon_g = 0.93$	$\gamma_g = 0.04$
封止材	$2\delta_s = 1.0$	$\lambda_s = 0.3$	—	—
バックシート	$\delta_b = 1.0$	$\lambda_b = 0.3$	—	—
集熱管壁	$\delta_p = 1.0$	$\lambda_p = 400$	—	—
断熱材	$\delta_a = 3.0$	$\lambda_a = 0.04$	$\varepsilon_a = 0.96$	—

### 2.2 PV/T コレクタの伝熱モデル

PV/T コレクタの伝熱モデルを図2に示す。外気温度  $T_o$  [°C] において短波長の日射エネルギー（日射強度） $q_i$  [W/m<sup>2</sup>] は①カバーガラス表面に入射し、一部は①カバーガラス表面で放射強度  $q_{rf}$  [W/m<sup>2</sup>] で反射するが、残りの日射エネルギーは①カバーガラスおよび②封止材で吸収されずにすべて透過したあと、黒体に近似した③セルに吸収されるものとする。③セルでは吸収した日射エネルギーの一部を電気エネルギーに変換し、残りを長波長の放射エネルギーとして放出する。すなわち、③セルは熱源として働き、熱は①カバーガラスおよび④バックシートへ熱伝導によって移動し、③セルの上方に熱流束  $q_g$  [W/m<sup>2</sup>]、下方に熱流束  $q_b$  [W/m<sup>2</sup>] として熱通過する。一方、集熱管内の水は、密度  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>]、比熱  $c_w$  [J/(kg·K)] および流速  $w$  [m/s] で流れている。ここで、③セルの下方へ移動する熱は、④バックシートおよび⑤集熱管壁（上部）を通過し、内径  $\delta_w$  の集熱管内の水に蓄熱される。さらに、水温  $T_w$  [°C] が外気温度  $T_o$  よりも高い場合は、水から⑤集熱管壁（下部）および⑥断熱材を経て PV/T コレクタ裏面の外気へ

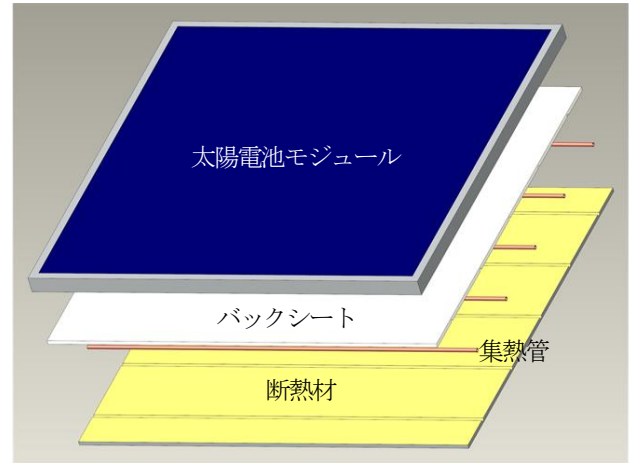
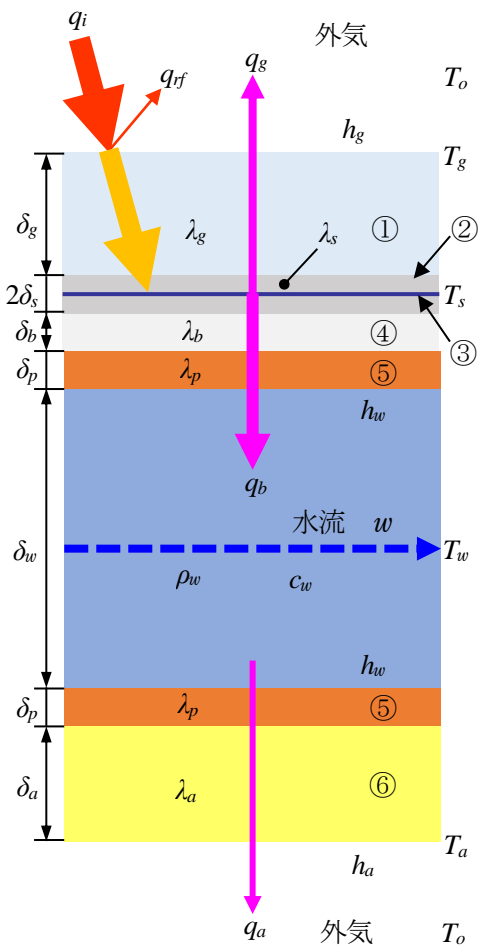


図1 水集熱直管式 PV/T コレクタのイメージ（分解図）



- ①カバーガラス ②封止材 ③太陽電池セル
- ④バックシート ⑤集熱管壁 ⑥断熱材

図2 PV/T コレクタの構成と伝熱モデル

熱流束  $q_a$  [W/m<sup>2</sup>] として通過することになる。

また、外気にさらされる①カバーガラス表面および⑥断熱材裏面は、ともに外気との対流熱伝達および熱放射による熱移動を伴う。ここで、①カバーガラス表面温度を  $T_g$  [°C]、③セル温度を  $T_s$  [°C]、⑥断熱材裏面温度を  $T_a$  [°C]、①カバーガラス表面および⑥断熱材裏面における熱伝達率を  $h_g$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] および  $h_a$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] とおく。また、①カバーガラス、②封止材、④バックシート、⑤集熱管および⑥断熱材の熱伝導率は一定とする。

### 2.3 PV/T コレクタの熱回路網

PV/T コレクタの熱回路網を図3に示す。図2の伝熱モデルとともに以下のように考える。

#### (1) エネルギーバランス

PV/T コレクタ内の③セルに到達する日射強度は次式のように表される。

$$q_i - q_{rf} = (1 - \gamma_g) \cdot q_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

また、③セルの変換効率  $\eta$  は、日射強度  $q_i = 1000$  [W/m<sup>2</sup>]、セル温度  $T_s = 25$  [°C]において  $\eta = 0.15$  [-]とした。ここで、変換効率  $\eta$  は日射特性を考慮せず、温度依存性として温度係数を  $-5.6 \times 10^{-4}$  / °C [5] と仮定すると、次式のように表される。

$$\eta = 0.15 + (25 - T_s) \times 5.6 \times 10^{-4} \quad \dots \dots \dots (2)$$

以上から、PV/T コレクタのモジュール部分におけるエネルギーバランスは次式のように表される。

$$q_i - q_{rf} = (q_i - q_{rf}) \cdot \eta + q_g + q_b \quad \dots \dots \dots (3)$$

また、PV/T コレクタの集熱管における蓄熱と水流の顕熱のエネルギーバランスは次式のように表される。

$$(q_b - q_a)A = n \rho_w w c_w \Delta T \cdot \frac{\pi \delta_w^2}{4} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、集熱管への水の流入温度は外気温度に等しいと仮定すると、 $\Delta T$ は水の流出入時の温度差 [K] ( $= T_w - T_o$ )、 $n$ は集熱管数、 $A$ はPV/T コレクタの集熱(受光)面積 [m<sup>2</sup>]である。

#### (2) 熱通過

③セルから上方への熱通過を考えると、③セルと外気の温度差はセル上方の熱抵抗  $R_g$  を用いて次式のように表される。

$$T_s - T_o = q_g \cdot R_g \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$R_g = \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{1}{h_g} \quad \dots \dots \dots (6)$$

③セルから下方への熱通過を考えると、③セルと集熱管内の水流の温度差は、セル下方の熱抵抗  $R_b$  を用いて次式のように表される。

$$T_s - T_w = q_b \cdot R_b \quad \dots \dots \dots (7)$$

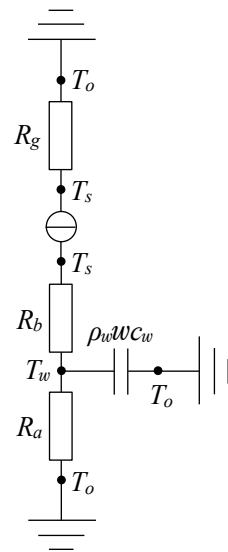


図3 PV/T コレクタの熱回路網

$$R_b = \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{h_w} \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $h_w$  は集熱管内の対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)] である。

また、集熱管内の水流から断熱材への熱通過を考えると、集熱管内の水流と外気の温度差は、この領域の熱抵抗  $R_a$  を用いて次式のように表される。

$$T_w - T_o = q_a \cdot R_a \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$R_a = \frac{1}{h_w} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h_a} \quad \dots \dots \dots (10)$$

①カバーガラス表面および⑥断熱材裏面における対流熱伝達による熱流束は、それぞれ次式のように表される。

$$q_{cg} = h_{cg}(T_g - T_o) \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$q_{ca} = h_{ca}(T_a - T_o) \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 $h_{cg}$  および  $h_{ca}$  は、①カバーガラス表面および⑥断熱材裏面における対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)] である。

また、熱放射による等価熱伝達[11]を導入すると、①カバーガラス表面および⑥断熱材裏面における熱放射による等価熱伝達率  $h_{rg}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] および  $h_{ra}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] は、次式のように表される[9]。

$$h_{rg} = \sigma \varepsilon_g \cdot (T_g^2 + T_o^2)(T_g + T_o) \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$h_{ra} = \sigma \varepsilon_a \cdot (T_a^2 + T_o^2)(T_a + T_o) \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここで、温度の単位は [K] であり、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)] ) である。

したがって、①カバーガラス表面および⑥断熱材裏面における熱伝達率  $h_g$  および  $h_a$  は次式で表される。

$$h_g = h_{cg} + h_{rg} \quad \dots \quad (15)$$

$$h_a = h_{ca} + h_{ra} \quad \dots \quad (16)$$

以上より、式(5)、式(7)および式(9)から次式が得られる。

$$q_g \cdot R_g = q_b \cdot R_b + q_a \cdot R_a \quad \dots \quad (17)$$

### (3) 計算条件

PV/T コレクタ周り(①カバーガラス表面および⑥断熱材裏面)における対流熱伝達については、強制対流に沿う等熱流束加熱平板における層流境界層および乱流境界層の平均熱伝達に関する次式を用いた[12].

$Re_L < 5.0 \times 10^5$  の場合:

$$Nu_L = 0.916Pr^{1/3} \cdot Re_L^{1/2} \quad \dots \quad (18)$$

$Re_L \geq 5.0 \times 10^5$  の場合:

$$Nu_L = 0.037Pr^{1/3} \cdot Re_L^{4/5} \quad \dots \quad (19)$$

ここで、 $Pr$  は空気のプロントル数 [-],  $Re_L$  はレイノルズ数 [-] ( $= U \cdot L / \nu$ ) および  $Nu_L$  は平均ヌセルト数 [-] ( $= h_c \cdot L / \lambda$ ) であり、 $U$  は風速 [m/s],  $L$  はPV/T コレクタの代表長さ[m] ( $L = 1.6$  [m] に設定)、 $\nu$  は空気の動粘性係数 [ $m^2/s$ ],  $h_c$  は対流熱伝達率 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ],  $\lambda$  は空気の熱伝導率 [ $W/(m \cdot K)$ ] である。PV/T コレクタ周りの対流熱伝達に関わる空気の各種物性値は、膜温度  $T_m$  ( $=$  外気温度と外面温度の単純平均値) に基づく値を用いた。

計算条件として、集熱管数  $n = 8$  [本], 集熱面積  $A (= L^2) = 2.56$  [ $m^2$ ] であり、日射強度  $q_i = 200 \sim 1000$  [ $W/m^2$ ], 集熱管内の水の流速  $w = 0.06 \sim 0.18$  [m/s] (集熱管内レイノルズ数は約  $600 \sim 2000$ ), PV/T コレクタ周りの風速  $U = 0.5 \sim 8$  [m/s] の範囲で変化させた。

集熱管内の対流熱伝達については、管内レイノルズ数範囲から等熱流束加熱管内の発達した層流強制対流平均熱伝達に関する次式を用いた[13].

$$Nu_L = 4.364 \quad \dots \quad (20)$$

ここで、 $Nu_w$  は集熱管内の平均ヌセルト数 [-] ( $= h_w \cdot \delta_w / \lambda_w$ ) であり、集熱管内の対流熱伝達に関わる水の物性値は、集熱管における流入水温と流出水温の平均値に基づく値を用いた。

以上、エネルギーバランスおよび熱通過の各関係式と計算条件より反復計算を行い、モジュール部分のセル温度  $T_s$  および集熱管の流出水温  $T_w$  を推定した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 水流量の影響

PV/T コレクタのセル温度と集熱管内の水流量の関係を図4に示す。水流量が増加すると、集熱作用が強くなることか

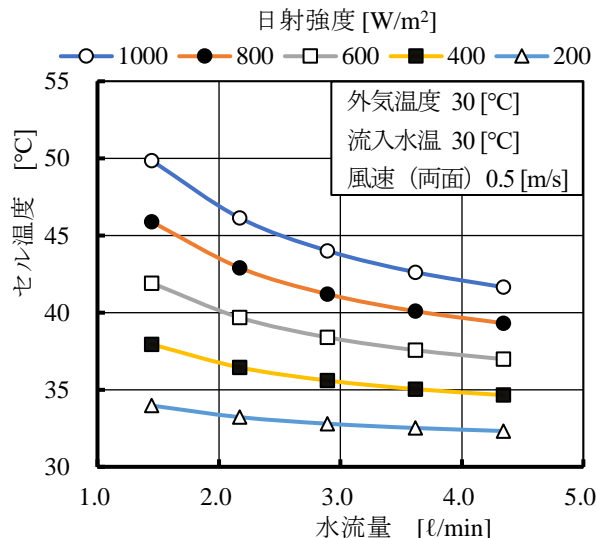


図4 セル温度に及ぼす水流量の影響

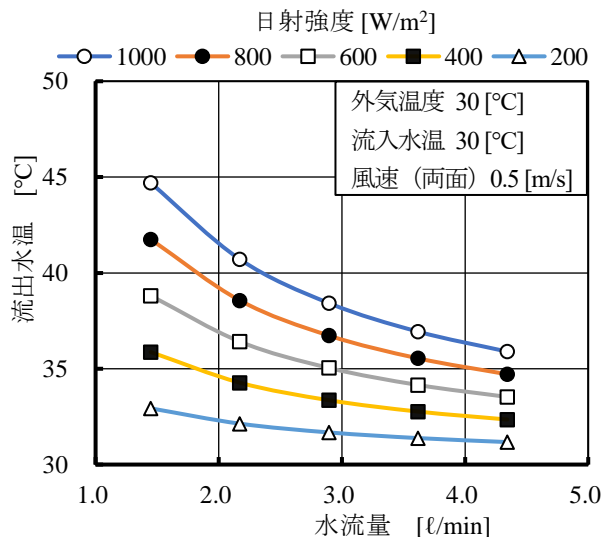


図5 流出水温と水流量の関係

らセル温度は明確に低下することがわかる。また、日射強度が増加するとセル温度は高くなるものの、水流量の増加によるセル温度の降下傾向は大きくなり、集熱効果が顕著に現れていることがわかる。したがって、PV/T コレクタの集熱機能によってセル温度の上昇を抑制する効果が期待できると考えられる。

つぎに、PV/T コレクタの集熱管における流出水温と水流量の関係を図5に示す。水流量が増加すると水流の熱容量が大きくなるため、流出水温は降下する傾向にあることがわかる。また、日射強度が大きくなると流出水温は高くなるが、水流量の増加による流出水温の降下傾向は大きくなり、水流量による流出水温の変化は顕著に現れていることがわかる。

したがって、水流量によってPV/T コレクタにおけるセル温度や流出水温の調節が可能であると考えられる。

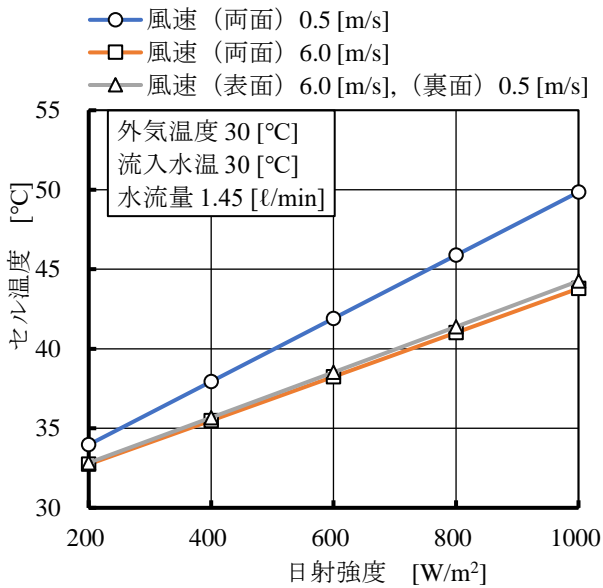


図6 セル温度に及ぼすPV/T コレクタ周りの風速の影響

### 3.2 PV/T コレクタ周りの対流の影響

集熱管の水流量を一定にして、PV/T コレクタのカバーガラス表面と断熱材裏面近傍の流れの状態を風速によって変化させた場合のセル温度の結果を図6に示す。ここで、PV/T コレクタ周りのレイノルズ数  $Re_L$  から、風速  $U = 0.5$  [m/s] では層流境界層流れ、 $U = 6.0$  [m/s] では乱流境界層流れとして扱った。

図6より、PV/T コレクタ両面の風速が  $U = 0.5$  [m/s] では、日射強度が増加するとセル温度の上昇が著しいことがわかる。一方、PV/T コレクタ両面の風速が  $U = 6.0$  [m/s] では、日射強度が増加するとセル温度の上昇は相対的に緩やかになることがわかる。また、カバーガラス表面の風速が  $U = 6.0$  [m/s]、断熱材裏面の風速が  $U = 0.5$  [m/s] について、両面の風速が  $U = 6.0$  [m/s] の場合と比較すると、セル温度はほぼ同じであることがわかる。したがって、PV/T コレクタの裏面は断熱性の高い材料であるため、断熱材裏面から外気への熱流束  $q_a$  は非常に小さくなり、セル温度に及ぼす断熱材裏面上の風速変化の影響はほとんどないことが考えられる。

### 3.3 PV/T コレクタ表面における風速の影響

PV/T コレクタ断熱材裏面上の風速を一定とし、カバーガラス表面上の風速を変化させた場合のセル温度分布を図7に示す。おおよそ風速  $U = 6.0$  [m/s] 以上では、レイノルズ数が  $Re_L \geq 5.0 \times 10^6$  であり、PV/T コレクタ表面上では乱流境界層流れとして扱った。

図7より、PV/T コレクタ表面の風速の増加とともにセル温度は低下することがわかる。また、日射強度の増加とともにセル温度は高くなるものの、表面の風速の増加とともにセル温度の降下は顕著になることが確認できる。

一方、PV/T コレクタ表面上の風速を変化させた場合の集熱管における流出水温分布を図8に示す。風速が増加すると流

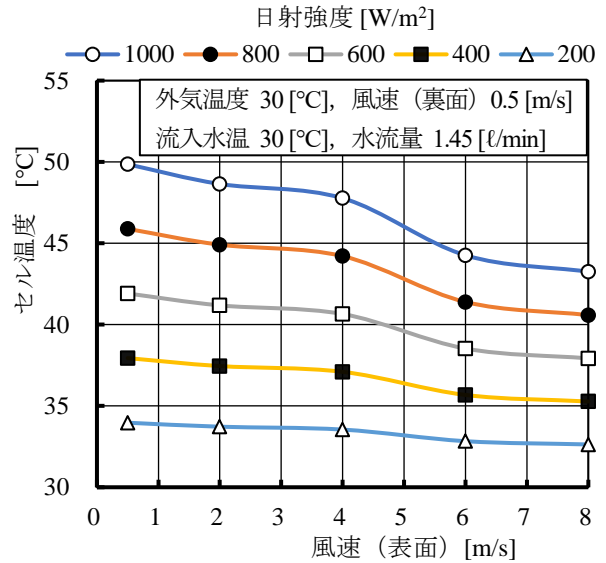


図7 セル温度に及ぼすPV/T コレクタ表面上の風速の影響

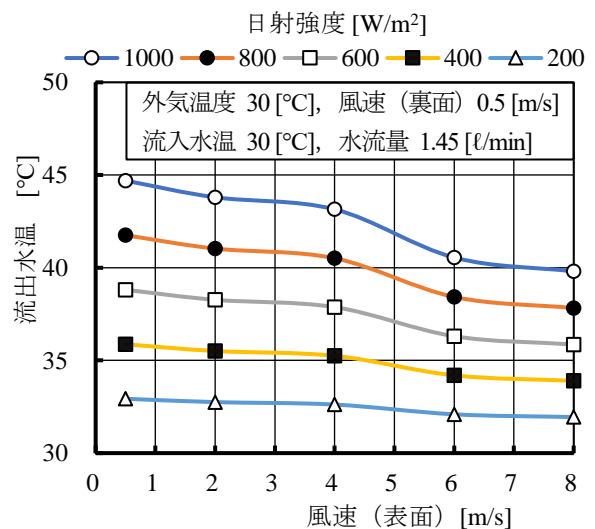


図8 流出水温に及ぼすPV/T コレクタ表面上の風速の影響

出水温は降下し、図7のセル温度分布と同様の傾向を示すことがわかる。したがって、セル温度や集熱管の流出水温には、PV/T コレクタ表面上の対流熱伝達性能の影響が大きいと考えられる。

### 3.4 セル温度と流出水温の時刻変化

NEDO年間特別日射量データベース (METPV-20) [14]を用いて、一例として福山市の8月1日における平均年 (2010年～2018年) の気象データおよび日射量データから、本計算条件でのセル温度および集熱管の流出水温の時刻変化を試算した。その結果を図9に示す。ここで、時刻14時の日射量は欠測による補間値とみなし割愛した。また、PV/T コレクタの表面 (受光面) は真南の方角、水平から角度  $30^\circ$  傾斜してい

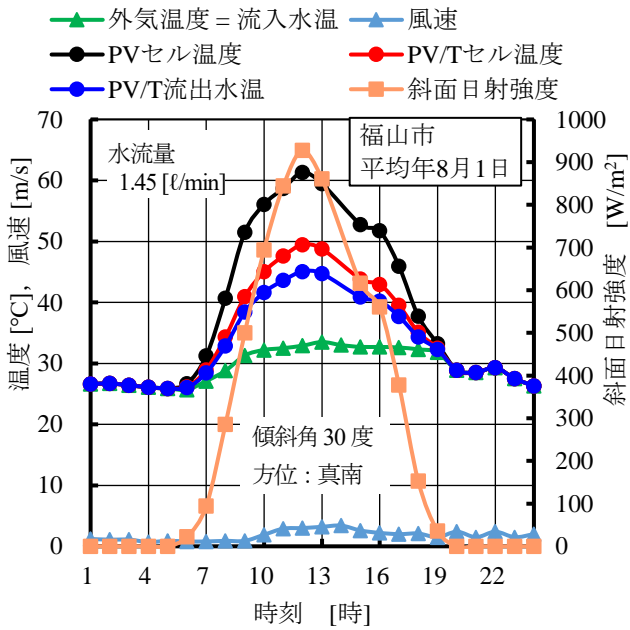


図9 セル温度と流出水温の時刻変化

る場合を想定して斜面日射強度データを用い、集熱管の水流量は一定とし、図には汎用モジュール (PV) のセル温度の推定分布も示す。汎用モジュールはカバーガラス、セルを含む封止材、バックシートで構成するものとし、PV/T コレクタのモジュール部分と同じ仕様とした。ただし、バックシートの厚さは0.3 mm とした[9]。

図9より、気象データでは日中の日射強度は時刻12時に  $q_i=900 [W/m^2]$  を超えており、気温も時刻9時~19時では  $T_o=30 [^{\circ}C]$  を超え、風速は時刻13時前後で  $U=3 [m/s]$  になる場合がある。このような気象条件下で、汎用モジュールのセル温度は最高  $T_s=60 [^{\circ}C]$  を超えて上昇することがわかる。一方、PV/T コレクタのセル温度は最高  $T_s=50 [^{\circ}C]$  付近まで上昇するが、汎用モジュールに比べて最大  $10 [^{\circ}C]$  くらい低くなっており、セル温度上昇の抑制効果が現れていることがわかる。また、PV/T コレクタ集熱管の流出水温はセル温度に近く、最高  $T_w=45 [^{\circ}C]$  付近まで上昇していることから、集熱効果が期待できると考えられる。

### 3.5 太陽エネルギー利用効率

本研究で扱う PV/T コレクタのモジュール変換効率  $\eta_{PV}$  および集熱効率  $\eta_T$  は、次式のように定義できる。

$$\eta_{PV} = \frac{(q_i - q_{rf}) \cdot \eta}{q_i} \dots \dots \dots (21)$$

$$\eta_T = \frac{n \cdot \rho_w \cdot w \cdot c_w \cdot \Delta T}{q_i \cdot A} \cdot \frac{\pi \delta_w^2}{4} \dots \dots \dots (22)$$

したがって、PV/T コレクタの太陽エネルギー利用効率は、モジュール変換効率  $\eta_{PV}$  と集熱効率  $\eta_T$  の総和になる。

PV/T コレクタの太陽エネルギー利用効率と集熱管の水流量

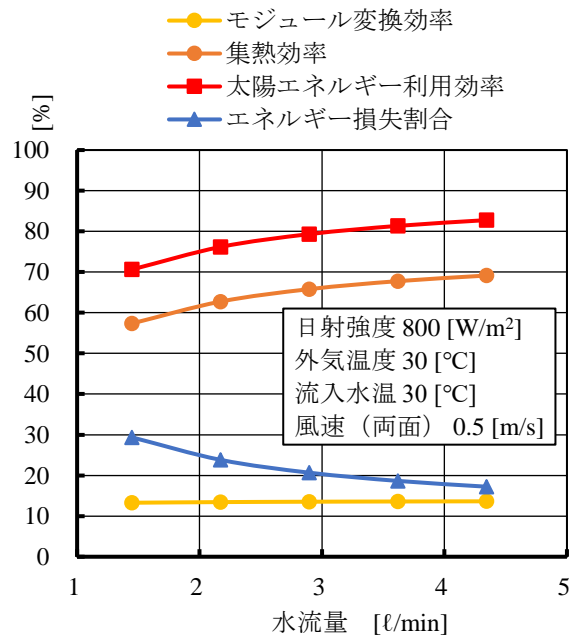


図10 PV/T コレクタの太陽エネルギー利用効率

量の関係を一例として図10に示す。ここで、本計算手法における PV/T コレクタのエネルギー損失は、カバーガラス表面の反射強度  $q_{rf}$  に加え、セル上方への熱流束  $q_g$  および断熱材裏面から外気への熱流束  $q_a$  による熱損失の総和になる。水流量が増加するとセル温度の上昇は抑制されるため、図のように水流量に関わらずモジュール変換効率はほぼ一定になることがわかる。一方、集熱効率は、実機の集熱器による太陽光から熱へのエネルギー変換効率が  $40 \sim 60 \% [15]$  に比べてやや高い値を示している。これは、定常次元の伝熱計算ではコレクタ側面からの熱損失を考慮していないためと考えられる。水流量の増加とともに集熱効率は上昇傾向にあることから、PV/T コレクタの太陽エネルギー利用効率は向上することがわかる。また、これまで得られた結果を踏まえると、水流量が減少する場合や PV/T コレクタ表面上の風速が増加する場合は、セル上方への熱流束  $q_g$  がセル下方への熱流束  $q_b$  よりも相対的に大きくなることによってコレクタ表面からの熱損失が増えるため、集熱効率および太陽エネルギー利用効率は低下するものと考えられる。

以上、本研究では強制対流による水集熱直管式 PV/T コレクタを取り扱い、本計算手法によってセル温度および集熱管の流出水温を試算できることを確認した。今後は PV/T コレクタの特性を実験的に明らかにし、実験結果と比較することによって本計算手法の妥当性を検証していく。

### 4. 結言

本研究では、強制対流による水集熱直管式 PV/T コレクタに関して、熱回路網法を用いた定常次元の伝熱計算を行ってセル温度および集熱管の流出水温の推定を試み、以下の結



果が得られた。

- (1) セル温度および集熱管の流出水温は、水流量の増加とともに降下し、日射強度の増加とともに上昇する。
- (2) セル温度および集熱管の流出水温は、PV/T コレクタ表面上の風速の増加とともに降下し、表面上の対流熱伝達性能の影響が大きい。
- (3) 気象データと水流量一定におけるセル温度と集熱管の流出水温の時刻変化では、集熱管によってセル温度の上昇が抑制され、集熱管の流出水温はセル温度付近まで上昇し、集熱効果が期待できる。
- (4) 日射強度一定において水流量が増加すると、PV/T コレクタのモジュール変換効率はほぼ一定であり、集熱効率は上昇することから、太陽エネルギー利用効率は向上する。

## 5. 参考文献

- [1] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構編：NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版 (PDF版) 第2章 太陽光発電, p.6, (2014). (online), available from < <https://www.nedo.go.jp/content/100544817.pdf>>, (accessed 2018-08-07).
- [2] 湯川元信, 浅岡正久, 高原景滋, 大城壽光, 黒川 浩助：太陽電池モジュール温度上昇の推定, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), **116**, pp.1101-1110, (1996).
- [3] 松川 洋, 黒川浩助：太陽電池モジュールの短時間間隔における温度特性解析, 日本太陽エネルギー学会太陽/風力エネルギー講演論文集, 2004, pp.153-156, (2004).
- [4] 門田昌郎, 三木祥平, 前田光治, 新船幸二：結晶系シリコン太陽電池モジュールの温度上昇抑制に関する研究, 兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告, No. 65, pp.8-13, (2013).
- [5] 原 重臣, 嘉数 誠, 佐藤梨都子, 千葉恭男, 増田 淳：結晶シリコン系太陽電池モジュールの温度係数評価, AIST 太陽光発電研究成果報告会, (2017).
- [6] S. S. Joshi, A. S. Dhoble: Photovoltaic-Thermal systems (PVT): Technology review and future trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **92**, pp.848-882, (2018).
- [7] A. Maleki, A. Haghighi, M. E. H. Assad, I. Mahariq, M. A. Nazari: A review on the approaches employed for cooling PV cells, *Solar Energy*, **209**, pp.170-185, (2020).
- [8] 田子拓弥, 吉牟田圭一, 石倉結花, 横山計三：太陽光ハイブリッドパネルの開発 (第1報) パネルの基本性能と年間システム集熱性能, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, **10**, pp.325-328. (2014).
- [9] 坂口勝次：太陽電池モジュールにおける熱回路網を用いたセル温度の推定, 福山大学工学部紀要, **43**, pp.135-140, (2020).
- [10] 増田 淳：太陽光発電産業・技術の最新動向と将来展望, *J. Vac. Soc. Jpn.*, **55**, pp.520-528, (2012).
- [11] 西川兼康, 藤田恭伸：伝熱学, 理工学社, p.325, (1989).
- [12] 日本機械学会編：伝熱工学資料 改訂第5版, 日本機械学会, pp.26-29, (2009).
- [13] 黒崎晏夫, 佐藤 勲：伝熱工学, コロナ社, p.75, (2009).
- [14] NEDO 年間特別日射量データベース (METPV-20).
- [15] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター：再生可能エネルギー熱利用分野の技術戦略策定に向けて, *TSC Foresight*, **41**, p.3, (2021-02-25).

