

## 太陽熱集熱器モデルの整備

太陽熱集熱器、シミュレーションモデル、集熱特性

富樫 英介\* 横山計二\*\*

### 1. はじめに

本計画では「平時の快適性」と「被災時の活動可能性」の両者を担保した、自立・車両型建築（D-ZEV: Disaster-robust Zero Energy Vehicle-home）を開発する。自立性能を確保するための主要なエネルギー源は太陽エネルギーであり、太陽光発電および太陽熱集熱器が有力な候補である。D-ZEV の仕様を検討するためにはこれらを導入した場合の性能を精度よく予測する必要がある。そこで本年度は既往の研究を調査し、太陽熱集熱器の計算モデルの整備を行った。

### 2. モデルの開発

平板型集熱器の理論に関しては Beckman と Duffie による図書<sup>1)</sup>および種村による解説<sup>2)</sup>が詳しく、本計画で開発するモデルもこれらを基礎とする。

#### 1) 集熱器の構造

図 1 に平板型集熱器の一般的な断面構造を示す。日射熱を取得するために日射吸収率の高い素材の集熱板が敷かれ、集熱板の熱を熱媒体に移動させるために、適当なピッチで集熱媒体流管が設けられる。熱媒体は通常は水であるが、冬期の凍結を防ぐために不凍液を循環させる例もある。外部への熱損失を防ぐという目的のため、集熱板の裏側には断熱材が設置される。一方、表側は日射透過率の高い素材（透過ガラス）で覆うことで、日射熱取得を阻害せずに対流による熱損失を抑制する。

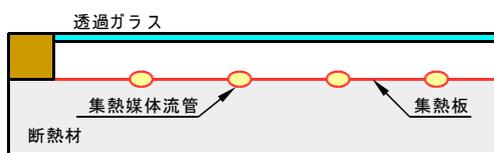


図 1 平板式集熱器の断面構造

#### 2) 集熱量の基礎式

太陽熱集熱器のパネル面へ入射する熱は、その全てが熱媒体へ移動するのではなく、いくらかは外部へ漏洩する。パネル面が吸収する日射量を  $S_p$  [W/m<sup>2</sup>] とすると、熱媒体へ有効に伝達できる熱量  $Q_u$  [W] は式(1)で表現できる。 $T_p$  [°C] と  $T_a$  [°C] はパネルと外気の温度である。

$$Q_u = A_c (S_p - U_L (T_p - T_a)) \quad (1)$$

$U_L$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] は外界への熱損失係数であり、その具体的な導出方法が問題であるが、図 2 に示す熱回路網として捉えれば、式(2)で計算できる。

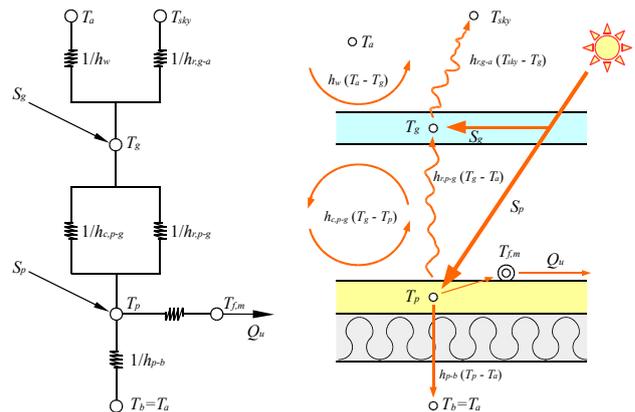


図 2 平板式集熱器の熱回路網表現

$$Q_u = A_c F_R \left( S_p + S_g \frac{U_{p-g}}{U_{p-g} + U_{g-a}} - U_L (T_{f,i} - T_a) \right) \quad (2)$$

集熱器熱除去因子  $F_R$  は次の 2 つの温度分布の影響をモデルに表現するための係数である。1) 集熱板の熱伝導の制約により熱媒体の流れと直交する方向に生じる温度分布（熱媒体流管部分で温度は最低となり、管から離れるに連れて上昇する）。2) 熱取得による熱媒体が集熱器内で昇温し、流れと並行する方向に生じる温度分布（熱媒入口側で温度は最低となり、出口に向かうに連れて上昇する）。集熱器熱除去因子  $F_R$  [-] はフィン効率を用いて式(3)で計算できる。

$$F_R = \frac{m_f c_p}{A_c U_L} \left[ 1 - e^{-A_c U_L F' / m_f c_p} \right] \quad (3)$$

$F'$  [-] は円管と平板で構成される集熱器のフィン効率であり、式(4)で計算する。

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L [d_o + (W - d_o) F]} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{\pi d_i h_{f,i}} \right]} \quad (4)$$

$d_i$  [m],  $d_o$  [m],  $W$  [m] はそれぞれ集熱媒体流管の内径、外径、設置間隔であり、図 3 に示す通りである。 $C_B$  は流管とパネルの間の接着剤部分の熱通過率であるが、流管とパネルが一体化した伝熱性の高い製品に関しては本項を無視 ( $1/C_B = 0$ ) しても大きな誤差は生まれない。 $h_{f,i}$  は熱媒体流管の内部の対流熱伝達率である。 $F$  [-] は四角フィンのフィン効率であり、式(5)、式(6)で計算する。ここで  $k$  と  $\delta$  はそれぞれパネルの熱

\* : 工学院大学 建築学部 建築学科

\*\* : 工学院大学 建築学部 まちづくり学科

伝導率 [W/(m·K)]と厚み [m]である。

$$F = \frac{\tanh[m(W - d_i)/2]}{m(W - d_i)/2} \quad (5)$$

$$m = \sqrt{U_L/k\delta} \quad (6)$$

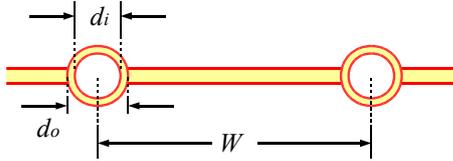


図3 集熱媒体流管と集熱板の構成

### 3) 係数の算出方法

基礎式内の各種の係数の具体的な算出方法を記す。

- ・ガラスの外側表面の対流熱伝達率  $h_w$

外界に面しているため、外部風速の影響により値が変わる。木村らによる実験式<sup>3)</sup>を式(7)に示す。 $v$ は風速[m/s]である。

$$h_w = 4.7 + 7.6v \quad (7)$$

- ・ガラスの外側表面の放射熱伝達率  $h_{r,g-a}$

天空を完全黒体(放射定数=1.0)とし、放射温度を  $T_{sky}$  [K]とすると式(8)で計算できる。ただし  $\sigma$  は黒体の放射定数で  $5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)である。また、 $\epsilon_g$  [-]はガラス面の長波長放射率である。近年の製品は、パネルからの熱損失量を低減することを目的に金属表面処理により放射率を下げている、0.05~0.2 程度の数値をとる。

$$h_{r,g-a} = 4\sigma\epsilon_g \left( \frac{T_{sky} + T_g}{2} \right)^3 \quad (8)$$

- ・パネルとガラスの内側表面の放射熱伝達率  $h_{r,p-g}$

式(9)で計算する。ただし、 $\sigma_{pg}$  は有効放射定数であり、パネルとガラスは平行平板であるとして式(10)で計算する。また、 $\epsilon_p$  はパネルの長波長放射率[-]であるが、素材にブラックステンレスやブラッククロームなどの選択吸収面を用いることで0.1程度に抑えている製品がある。

$$h_{r,p-g} = 4\sigma_{pg} \left( \frac{T_p + T_g}{2} \right)^3 \quad (9)$$

$$\sigma_{pg} = \frac{\sigma}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_g - 1} \quad (10)$$

- ・パネルとガラスの内側表面の対流熱伝達率  $h_{c,p-g}$

式(11)で計算する。ただし、 $\lambda_a$  [W/(m·K)]は空気熱伝導率、 $L_p$  [m]は空気層の厚みである。 $Nu$  はヌセルト数であるが、CSDにより自然対流を抑制し  $Nu=1.0$  として運用可能な製品がある。

$$h_{c,p-g} = (\lambda_a/L_p)Nu \quad (11)$$

- ・パネルから集熱器背面への熱通過率  $h_{p-b}$

断熱材の厚みを  $l$  [m]、熱伝導率を  $\lambda_i$  [W/(m·K)]として式(12)で計算する。

$$h_{p-b} = \lambda_i/l \quad (12)$$

- ・熱媒体流管の内部の対流熱伝達率  $hf_i$

管内流速と無次元数を用いて導出する。

- ・ガラス面日射吸収  $S_g$  とパネル面日射吸収  $S_p$

ガラス面に入射した日射エネルギーは反射と透過を繰り返して一部は外界に逃げ、一部はガラスに吸収され、一部はパネル面に吸収される。無限回の反射と吸収を繰り返した結果、ガラス面に吸収される日射量とパネル面に吸収される日射量は式(13)~(16)で計算できる。ここで  $\alpha_{T,g}$  と  $\alpha_{T,p}$  は総合吸収率[-]、 $\tau_g$  は日射透過率[-]、 $\alpha_g$  と  $\alpha_p$  は日射吸収率[-]、 $\rho_g$  と  $\rho_p$  は日射反射率[-]である。添字の  $g$  と  $p$  はそれぞれガラスとパネルを表している。

$$S_g = I_{DN} \cdot \alpha_{T,g} \quad (13)$$

$$S_p = I_{DN} \cdot \alpha_{T,p} \quad (14)$$

$$\alpha_{T,g} = \alpha_g + \tau_g \rho_p \alpha_g + \tau_g \rho_g \rho_p^2 \alpha_g + \dots = \alpha_g \left( 1 + \frac{\tau_g \rho_p}{1 - \rho_g \rho_p} \right) \quad (15)$$

$$\alpha_{T,p} = \tau_g \alpha_p + \tau_g \rho_g \rho_p \alpha_p + \tau_g \rho_g^2 \rho_p^2 \alpha_p + \dots = \frac{\tau_g \alpha_p}{1 - \rho_g \rho_p} \quad (16)$$

### 4) 解法

以上の基礎式を統合し、集熱器の集熱量を計算するフローを図4に示す。パネルおよび硝子の温度を未知数として収束計算を行う。

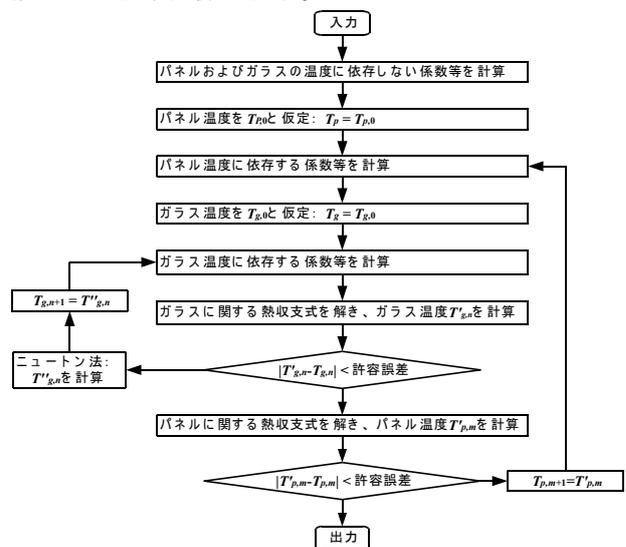


図4 集熱器の計算フロー

### 3. おわりに

太陽熱集熱器のモデルを整備した。次年度は本モデルも活用しつつ、導入する集熱器の仕様を固める。

#### 参考文献

- 1) John A. Duffie, William A. Beckman : Solar Engineering of Thermal Processes, 1950
- 2) 種村栄 : 平板形太陽熱集熱器の高性能化の理論的背景と現状, 空気調和・衛生工学 57(1), 1983, pp.9-17
- 3) 伊藤直明, 佐藤鑑, 岡樹生 : 自然風下における建築物外壁面の対流熱伝達について(II), 日本建築学会大会学術講演梗概集. 計画系 43, 1968, pp.239-240