

平板型コレクターの最適温度・流量条件

The Optimum Outlet Temperature Condition of
Flat-Plate Type Solar Collectors

鈴木 研夫*
Akio SUZUKI

Abstract

The expression of the optimum outlet temperature condition of solar collectors was derived from the exergy analysis. The theoretical expressions were all developed from the fundamental heat-balance equations that were applied on the collector plate by use of the Newton's law of cooling. The optimized condition was obtained as a function of the fluid outlet temperature, T_o , under the assumption of the steady state as follow :

$$T_o - T_i - T_a \ln(T_o/T_i) = (T_{c^m} - T_o)(1 - T_a/T_o) \ln((T_{c^m} - T_i)/(T_{c^m} - T_o)),$$

where T_{c^m} is the stagnation temperature of the collector.

This equation was confirmed by the calculation of the same collector model used in the theoretical analysis. The results from the numerical calculations indicated that the optimum running mass-flow rate of the collector was approximately constant when $T_i = T_a$ in various insulations. In this condition, the exergy efficiency was also maintained maximum.

記号表

T_a	コレクター外気温 (K)
T_o	熱媒体出口温度 (K)
T_i	熱媒体入口温度 (K)
T_c	集熱板平均温度 (K)
T_f	熱媒体平均温度 (K)
T_s	太陽の有効表面温度 (K)
S_r	コレクター受光面積 (m^2)
S_p	集熱板面積 (m^2)
U	集熱板単位面積当たり全熱損失係数 (W/ m^2 deg)
I	コレクター面での単位面積当たり日射量 (W/ m^2)
F'	プレートファクター (-)
F_R	リムーバルファクター (-)
C_p	集熱板の単位体積当たり熱容量 (J/ m^3 ·deg)
V	集熱板の総体積 (m^3)
m	熱媒体質量流量 (kg/s)
c	熱媒体熱容量 (J/kg deg)
η_{op}	光学的効率 (-)
η	瞬時効率 (-)
η_{ex}	瞬時エクセルギー効率 (-)
$\dot{\mathcal{E}}_g$	取得エクセルギー (流) (J) (W)
$\dot{\mathcal{E}}_i$	入射エクセルギー (流) (J) (W)

dS/dT : エントロピー生成(速度)(J/deg)(W/deg)
 T_{c^m} : 集熱板上限温度 (K)

1. はじめに

現在、国内外に於いて種々の大陽熱集熱器（以下コレクター）が、試作、研究、又販売されているが、それら多くのコレクターについてまだ統一的な評価を与えるような解析はあまり行われていない。又、あるコレクターに対し、最適使用条件を与えるような解析も非常に少ない^{7,8)}。Bejanら⁴⁾は、より一般化した解析からエントロピー生成の概念を使って最適化を行っているが、その最適条件式の導出まで至らず、結果は数値計算に依るもののが大きい。又、藤原ら⁵⁾は、熱媒体入口温度 T_i と流量 m をパラメーターとしたコレクターのエクセルギー的な評価を行っているが、やはり数値計算に依った結果だけである。本研究では、より具体的でかつ明確な流量と出口温度の最適値を得る事、又これらの解析がコレクター及びそのシステム設計などに於いて指針を与えるものである事を目的として行われた。

理論的な展開に於いては、現在迄に最も良く使用さ

*上智大学理工学部物理学教室
株式会社 国城金型工業より出向中

れてきた一般的な解析式を用い、近年その考え方の普及してきたエクセルギーの考え方を加え合わせ、ある想定したコレクターモデルに対して適用した。このエクセルギーの考え方が太陽エネルギーを利用する上で有用なものであることは、既に押田¹¹⁾が指摘している。

一般にコレクターの性能を評価する上では、エネルギー効率対温度の曲線が使用される。しかし、これらの解析式は、コレクターの最適温度・流量条件を決定するには何の情報ももたらさない。これは、効率曲線が単調減少関数である事に起因し、取得エネルギー量は得られても、そのエネルギーに付随する付加価値（エネルギーの質）に関する情報を何も持っていない為である。本研究では、取得エネルギーの量及び質の両方を評価するために、エクセルギーの概念を導入して考察を行った。その結果、瞬時エクセルギー効率曲線は一つの極大値を持つ事が明らかとなり、その付近でコレクターを使用する事が最適温度・流量条件であると考えられる。

2. 一般的な解析式

通常のコレクター解析の最も基本的な熱収支を表わす式は、集熱板に於けるエネルギー受授に注目した、

$$C_p V \frac{dT_c}{dt} = Q_{IN} - Q_{loss} - Q \quad \dots \dots \dots (1)$$

である。ここに、 Q_{IN} は太陽から集熱板に与えられる入射エネルギー流、 Q は取得エネルギー流、及び Q_{loss} は外気への損失エネルギー流であり、一般にはニュートンの冷却法則が成り立っているとする。

コレクターの性能評価を行う場合、日射の変化が充分ゆっくりであるとし、その時の日射に対する定常状態として(1)で扱われる事が多い。この時(1)は、 $dT_c/dt=0$ として、 $Q=Q_{IN}-Q_{loss}$ より、

$$\dot{m}(T_0 - T_i) = \eta_{op} S_r I - S_p U (T_c - T_a) \quad \dots \dots \dots (1')$$

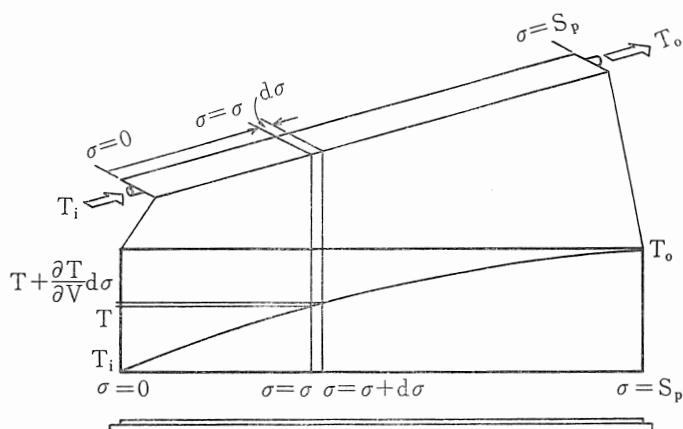


図 1 集熱板モデルと熱媒体温度上昇モデル

として表わされるのが一般的である。(1')を使って得られる瞬時効率 η は、

$$\eta = \frac{\dot{m}(T_0 - T_i)}{S_r I} = \eta_{op} - \frac{S_p U}{S_r} \frac{T_c - T_a}{I} \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。縦軸に η 、横軸を $(T_c - T_a)/I$ として(2)のグラフを描けば、y 切片が光学的効率 η_{op} 、x 切片がコレクター上限温度

$$T_{cm} = T_a + \eta_{op} S_r I / S_p U$$

を表わす $(T_{cm} - T_a)/I$ の 1 本の直線となる。この時、その傾きが小さい程断熱性が優れていると評価され、高温度集熱を目的とした場合に有利な条件となる。実際には、この直線は η_{op} まで到達せず、集熱板の構造因子であるプレートファクター F' の影響を受け、 $\eta \leq F' \eta_{op}$ となる。プレートファクター F' は、集熱板全体が熱媒体平均温度 T_f に等しいとした場合の集熱量と、実際の集熱量との比として定義されている。この事に関するもう少し詳しい事は後述される。

次に、集熱媒体平均温度 T_f を使って瞬時効率 η が表わされる場合について述べる。この時は、プレートファクター F' が導入され、定常状態に於ける熱バランスの式、

$$\dot{m}(T_0 - T_i) = F' \{ \eta_{op} S_r I - S_p U (T_f - T_a) \} \quad \dots \dots \dots (3)$$

が、 F' の定義式として知られている。又、 F' は集熱板の構造と材質の物性によって決定され、数値的に得る事ができる^{1,2)}。 T_f は、流速が十分大きい場合には $(T_0 + T_i/2)$ でよく近似されるが、必ずしも正確であるとは言えない。特に流量が小さい時には、そのずれは無視できないものとなる。

本研究に於ける流体の温度の記号を図 1 のようにつける。これは普通の平板型コレクターを一次元化して 1 つの流管ユニットとしてモデル化したものであるがたくさんの分岐を持つコレクターに対しても本質的な違いは無いと考えられる。流体の入口から、面積 σ まで行った部分での微少領域 $d\sigma$ を考え、そこを通る流体温度 T に注目する。この時、

$$\dot{m} \frac{dT}{d\sigma} = F' \left\{ \eta_{op} \frac{S_r}{S_p} I - U(T - T_a) \right\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

が成立する¹⁾。 $\sigma=0$ の時 $T=T_i$ の境界条件でこの式を解けば、先のコレクター上限温度 T_{cm} を使って、

$$T = T_{cm} - (T_{cm} - T_i) \exp \left(-F' \frac{U}{\dot{m}} \sigma \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

が得られる。(5)より、 $\sigma=S_p$ の時に出口温度 T_0 が与えられるので、

$$T_0 = T_{cm} - (T_{cm} - T_i) \exp\left(-F' \frac{S_p U}{cm}\right) \dots (6)$$

となる。上式は、質量流量 \dot{m} 、日射量 I 、及び出口温度 T_0 の 3 つの物理量が密接に関係した式となってい る。(5)より、熱媒体平均温度 T_f は、

$$T_f = \frac{\int_0^{S_p} T_f d\sigma}{\int_0^{S_p} d\sigma} = T_{cm} - \frac{1}{F'} \frac{cm}{S_p U} (T_0 - T_i) \dots (7)$$

で与えられる。上式で $\dot{m}=0$ とすれば、熱媒体平均温度 T_f が上限温度 T_{cm} に一致するのがわかる。又、(6)を考慮して(7)を $\dot{m} \rightarrow \infty$ として計算すれば、その極限で、 T_f は $(T_0 + T_i)/2$ と一致する。

熱媒体入口温度 T_i を使って解析する場合には、リムーバルファクター F_R が用いられる¹⁾。この時、熱バランスの式は、

$$\dot{m}(T_0 - T_i) = F_R \{ \eta_{op} S_r I - S_p U (T_i - T_a) \} \dots (8)$$

で、表わされる。(8)は、プレートファクター F' と同様にリムーバルファクター F_R の定義式になっている。即ち、集熱板全面が入口温度に等しい時の集熱量と、実際の集熱量との比で定義される。この式に(6)を代入すれば、

$$F_R = \frac{cm}{S_p U} \left\{ 1 - \exp\left(-F' \frac{S_p U}{cm}\right) \right\} \\ = \frac{cm}{S_p U} \left(1 - \frac{T_{cm} - T_0}{T_{cm} - T_i} \right) \dots (9)$$

が得られる。

(8)と(9)からわかる通り、もし入口温度 T_i が外気温 T_a と等しい場合には、集熱量 Q は日射 I と流量 \dot{m} だけから求める事ができるのがわかる。又、瞬時効率 η は流量 \dot{m} だけの関数となる。アメリカの ASHRAE (the American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) では、この入口温度 T_i を使用したコレクターの性能解析を推奨しているが、これは入口温度 T_i を測定する事の簡便さに起因するものと考えられる。

集熱量を $Q (= \dot{m}(T_0 - T_i))$ として、(8)に代入し T_i を消去すれば、熱媒体出口温度 T_0 を使った熱バランス式、

$$Q = \dot{m}(T_0 - T_i) = F_0 \{ \eta_{op} S_r I - S_p U (T_0 - T_a) \} \dots (10)$$

が得られる³⁾。ここに、 F_0 は、

$$F_0 = \frac{cm}{S_p U} \left\{ \exp\left(F' \frac{S_p U}{cm}\right) - 1 \right\} = \frac{cm}{S_p U} \frac{T_0 - T_i}{T_{cm} - T_0} \dots (11)$$

で与えられ、 F' 及び F_R と同様の因子である。

3. エクセルギー解析

エクセルギーの考え方とは、その概念により外界との差に關係する量として定義される⁹⁾。この關係は、電気工学に於いて、地球を電位ゼロとしている事と相似である。即ち、マイナスの電位がエネルギーとして有効であるように、エクセルギーでは、外気温より低い温度を持つ物質でもエネルギーとして有効である事に相当する。この事から、コレクター内を流れる熱媒体に対してエクセルギー解析を用いる場合には、入口温度 T_i が外気温 T_a と比べて低い場合には、エクセルギーの損失を伴なう事に注意すべきである。即ち $T_i < T_a$ の場合には、コレクターに流入する前に持っていたエクセルギーをコレクター内で 1 度消滅し、再びエクセルギーを得るという事になる。

物理的な意味でのエクセルギーの概念は、あるエネルギーを持つ物体とそれを取り巻く環境との間で成す事のできる最大仕事として表現される。この時、系内では可逆過程が成立していかなければならない。即ち、あるエネルギー量のうち、可逆機関を使って外界に対して成すことのできる仕事の量がエクセルギーとして定義されるわけである。これは熱力学第 2 法則に於いて、最大仕事の原理として知られたものであり、仕事への転換可能分をエクセルギーと呼ぶわけである。

熱源がある有限な熱量 Q_f を持つ場合は、その熱源が外界を低熱源として行う事のできる最大仕事、即ちその熱源の持つエクセルギー \mathcal{E}_g は、カルノー効率の積分、

$$\mathcal{E}_g = W_{max} = \int_{Q_a}^{Q_f} \left(1 - \frac{T_a}{T} \right) dQ$$

で与えられる。ここに、 Q_a は $T = T_a$ となった時のその熱源の持つエネルギーであり、外界に対しての仕事は全く行えない状態である。

コレクター内を集熱媒体が流れる事によって取得するエクセルギーは、エネルギーの流れの中から得られるものであるから、エクセルギー流 $\dot{\mathcal{E}}_g$ として評価されなければならない。即ち、

$$\dot{\mathcal{E}}_g = \int_{T_i}^{T_0} \left(1 - \frac{T_a}{T} \right) cm dT \\ = \dot{m}(T_0 - T_i - T_a \ln(T_0/T_i)) \dots (12)$$

で、表わされる。ここで、集熱媒体の比熱 c の温度依存性は無視した。尚、以下の展開に於いても定数として取り扱う。先のエクセルギーの定義より、ある系に於いてエントロピーが増大すれば、系の持つエクセルギーは必ず減少する。これは Guoy-Stodola の定理⁶⁾

として知られたものである。太陽からのエネルギー流をコレクターによって取得するシステムに於けるエンタロピー生成速度を $4S'$ とすれば、

でなければならない。ここで、 $\dot{\epsilon}_i$ は太陽からの入射エクセルギー流を表わし、太陽の有効表面温度を T_s として

$$\dot{\mathcal{E}}_i = S_r I \left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right)$$

で表わされる。ここにエクセルギーの立場での太陽の有効表面温度 T_s は、地球が太陽より充分遠方にある事を考慮し、光波の持つエントロピーのうち光波の圧力が寄与する部分を除外して考えれば、太陽を黒体とした有効表面温度 ($\approx 5800\text{K}$) に等しいと考えられる。

エントロピー生成に対する考察より⁴⁾,

が得られる。(14)に(1')を代入して整理する事により(13)の Guoy-Stodola の定理を満足する事がわかる。もし可逆過程が成り立つならば、 $\Delta\dot{S}=0$ であり、(13)から $\dot{\mathcal{E}}_g = \dot{\mathcal{E}}_i$ となり、瞬時エクセルギー効率 η_{ex} は 1 となる。しかし、カバーガラス等による光学的効率 η_{op} を考慮して、集熱板に注目したエントロピー生成を考えれば、

$$\Delta \dot{S}_c = \frac{S_p U (T_c - T_a)}{T_a} + \dot{m} \int_{T_i}^{T_0} \frac{cdT}{T} - \eta_{op} \frac{S_r I}{T_s} \dots \dots \dots (15)$$

となり、この時(13)は、

$$d\dot{S}_c = \frac{1}{T_a} \left[\eta_{op} \dot{\varepsilon}_i - \dot{\varepsilon}_g \right] \dots \dots \dots \quad (16)$$

と表わされる。(16)を使って瞬時エクセルギー効率 η_{ex} を表わせば、

となり、瞬時エクセルギー効率も光学的効率 η_{op} を越えられない事がわかる。

4. 最大エクセルギー効率

先の議論より、コレクターの瞬時エクセルギー効率 η_{ex} は、

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_g}{\dot{E}_i} = \frac{cm(T_0 - T_i - T_a \ln(T_0/T_i))}{SRI(1 - T_a/T_s)} \quad \dots \quad (18)$$

で表わされる。元より定常状態を仮定している事から日射量 I は一定として考え、変数は T_0 と m の 2 つだけとなる。尚、この 2 つの変数は(6)の関係式を満足している。ここで、

$$\gamma \equiv \dot{m}(T_0 - T_i - T_a \ln(T_0/T_i)) \quad \dots \dots \dots (19)$$

と置き、この γ を最大にする条件を求める事を考える。この事は、(15), (16)に於ける $d\dot{S}$ を最小とするのに等しい⁴⁾。

先ずその準備として、流量を $m \rightarrow \infty$ 及び、 $m = 0$ とした時の場合について考えてみる。(6)を考慮して集熱量 $Q = cm(T_0 - T_i)$ の $m \rightarrow \infty$ に於ける極限値は

$$\lim_{m \rightarrow \infty} Q = F' \{ \eta_{op} S_r I - S_p U(T_i - T_a) \} \dots \dots \dots (20)$$

となる。即ち、 $m \rightarrow \infty$ の極限に於いて、瞬時効率 η は、
 $F' \left\{ \eta_{op} - \frac{S_p U}{S_r I} (T_i - T_a) \right\}$ に収束する事がわかる。 $T_i = T_a$ の時は、明らかに $\eta^{m \rightarrow \infty} \rightarrow F' \eta_{op}$ となり、瞬時効率 η は $F' \eta_{op}$ を越えられず、光学的効率 η_{op} だけでなく、プレートファクター F' も大きな因子となっているのがわかる。同様にして、(19) の $m \rightarrow \infty$ に於ける極限は、

$$\lim_{\dot{m} \rightarrow \infty} \gamma = \frac{F'}{c} \left\{ \eta_{op} S_r I - S_p U (T_i - T_a) \right\} \left(1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \quad \dots \dots \dots (21)$$

となる。この時、瞬時エクセルギー効率 $\eta_{ex}^{m \rightarrow \infty}$ は、

$$\eta_{ex}^{\dot{m} \rightarrow \infty} = F' \left\{ \eta_{op} - \frac{S_p U}{SrI} (T_i - T_a) \right\} \frac{1 - T_a/T_i}{1 - T_a/T_s} \\ = \eta \frac{1 - T_a/T_i}{1 - T_a/T_s} \dots \dots \dots \quad (22)$$

で表わされ、 $T_i = T_a$ の時は $\dot{\eta}_{ex}^{m \rightarrow \infty} = 0$ となる事がわかる。尚、 $T_i < T_a$ の時は、 $\dot{\eta}_{ex}^{m \rightarrow \infty} < 0$ となるが、これはエクセルギーを損失しただけの事を表わしている。

これらの事より、 $m \rightarrow \infty$ の極限に於いて、取得エクセルギー流（又は瞬時エクセルギー効率）及び取得エネルギー流（又は瞬時エネルギー効率）は、無限大に発散する事なく、ある有限値に収束する事が明らかになった。又、 $m=0$ の場合には、(18)より $\eta_{ex} = 0$ である事は明白であり、 $T_i = T_a$ の条件に於いて、 $m = 0$ と $m \rightarrow \infty$ との間に、最大エクセルギー効率 η_{ex}^{max} が存在する事は明らかである。

(19)に於ける最大値が満たすべき条件は、 $d\gamma/dT_0 = 0$ より求められる。この時、

$$\frac{d\gamma}{dT_0} = \frac{d\dot{m}}{dT_0}(T_0 - T_i - T_a \ln(T_0/T_i)) + \dot{m}\left(1 - \frac{T_a}{T_0}\right)$$

となり、(6)を使って(23)を整理すれば、コレクターの最適出口温度必要条件として、

$$T_0 - T_i - T_a \ln \frac{T_0}{T_i} = (T_c^m - T_0) \left(1 - \frac{T_a}{T_0}\right) \ln \left(\frac{T_c^m - T_i}{T_c^m - T_0}\right) \dots (24)$$

が求められる。尚、(24)は $d\gamma/d\dot{m}=0$ の条件からも同様に導かれる。この式は超越方程式となっている為、解の導出は数値計算に頼らなければならない。しかし、(24)を満足するある1つの解として、 $\dot{m} \rightarrow \infty$ の際の $T_0 \rightarrow T_i$ が存在する。即ち、 $T_i = T_a$ の場合、 $\dot{m} \rightarrow \infty$ で $\eta_{ex} \rightarrow 0$ となるにもかかわらず、この時の値が(24)を満足する事になる。これは、エクセルギーがエネルギーの質及び量の両者と共に評価する性質上、エネルギーの量の評価に重みがかかった為と解釈する事ができる。

ここで、(24)の最適出口温度の必要条件式を満足する解のうち、そのエクセルギー効率の大きいものを解として採用するという規定を行う。この条件のもとで(24)を評価する事を行えば、 $T_i < \sqrt{T_c m T_a}$ の際には $m \rightarrow \infty$ を除いた解が存在し、その時の値が最大エクセルギー効率を与える、 $T_i \geq \sqrt{T_c m T_a}$ の際には、 η_{ex} は温度軸に対して単調減少関数となる事から、 $m \rightarrow \infty$ の $T_0 \rightarrow T_i$ の値が最大エクセルギー効率を与える事がわかるAPP.)。また、これらの値は、Bejan ら⁴⁾及び藤原ら⁵⁾の指摘した最高エクセルギー効率 $\eta_{ex}^{m, max}$ を越える事はできないAPP)。尚、(24)の結果は、 $T_i = T_a$ した時の Bejan ら⁴⁾の数値計算結果と一致する。

(24)を満足する T_0^{opt} に対する最適質量流量 \dot{m}^{opt} は、(6)より求める事ができて、

$$(\dot{m}/S_p)^{opt} = F' \frac{U}{c} \left\{ \ln \left(\frac{T_c m - T_i}{T_c m - T_0^{opt}} \right) \right\}^{-1} \quad \dots \dots \dots (25)$$

となる。(25)は、日射量 I が一定の条件で、単位集熱板面積当たりの最適質量流量 $(\dot{m}/S_p)^{opt}$ が一意に定まる事を示している。又、この時得られる集熱板単位面積当たりの最大取得エクセルギー流 $(\dot{E}_g/S_p)^{max}$ は、

$$\begin{aligned} & (\dot{\mathcal{E}}_g / S_p)^{max} \\ &= c(m / \dot{S}_p)^{opt} \left(T_c^{opt} - T_i - T_a \times \ln \frac{T_c^{opt}}{T_i} \right) \\ &= F' U (T_c^m - T_c^{opt}) (1 - T_a / T_c^{opt}) \dots (26) \end{aligned}$$

で求められる。この事は、あるコレクターに期待される必要なエクセルギー量が知れれば、(26)によってその必要最小の面積が決定できる事を表わす。又、最大

瞬時エクセルギー効率 η_{ex}^{max} は、(18)と(24)より、

$$\eta_{ex}^{max} = \frac{c^{mopt}(T_0^{mopt} - T_a - T_a \ln(T_0^{mopt}/T_a))}{S_r I(1 - T_a/T_s)} \\ = F' \frac{S_p U}{S_r I} (T_c^m - T_0^{mopt}) \cdot \frac{1 - T_a/T_0^{mopt}}{1 - T_a/T_s} \dots \dots \dots (27)$$

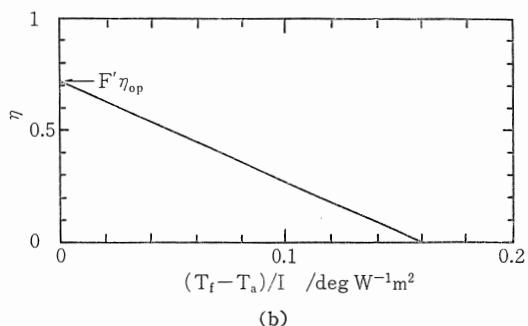
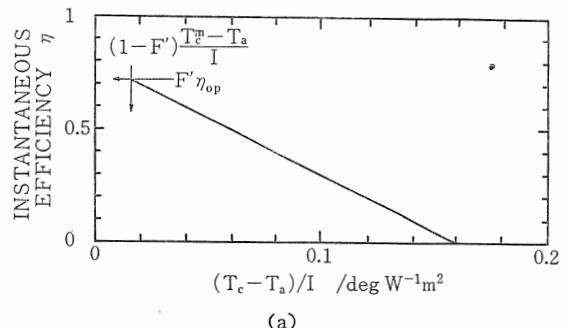
で与えられる。

5. 数値計算結果と考察

コレクターモデルとしては、集熱板面積 $S_p=1\text{m}^2$ を持つ図1で表わされた一次元モデル化した平板型コレクター ($S_r=S_p$) とし、集熱板からの全熱損失係数 $U=5\text{W/m}^2\cdot\text{deg}$ 、光学的効率 $\eta_{op}=0.8$ 、プレートファクター $F'=0.9$ とした。又、外気温 $T_a=300\text{K}$ とし、熱媒体コレクター入口温度 T_i は常に外気温と等しいものと仮定した、熱媒体としては通常の水を使用したとして計算を行い、沸点による影響は考えなかった。計算の対象とした日射量 I は、 $300\sim 1,100\text{W/m}^2$ とし、 100W/m^2 ごとに計算を行った。

上記のように、 $T_i = T_a$ として入口温度を定数とした為、入口温度による解析は行わなかった。入口温度 T_i が外気温 T_a より低い場合には、コレクターに流入するまでの流路を外気の中で充分長く採る事によって $T_i = T_a$ の条件が達成でき、かつその方がエクセルギー的に有利なものと考えられるので、この場合についても計算は行わなかった。

先ず、瞬時エネルギー効率曲線について調べてみる。図2には、横軸として、a) $(T_c - T_a)/I$, b)



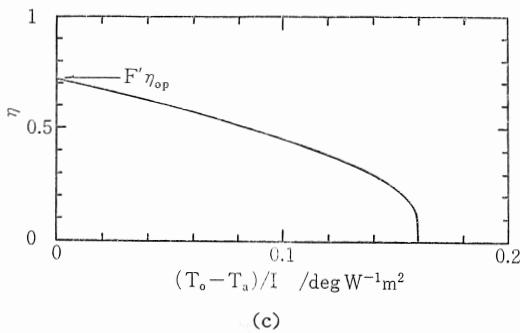


図 2 横軸に a) 集熱板平均温度, b) 热媒体平均温度, 及び c) 热媒体出口温度を採用した時の瞬時効率曲線

$(T_f - T_a)/I$, 及び c) $(T_0 - T_a)/I$ としたものを示す。パラメーターとしては, m を変化させる事で計算を行った。図 2 a は(2)を基に算出した効率曲線である。効率曲線は縦軸の $\eta = \eta_{op}$ まで達せず, $\eta = F' \eta_{op}$ ($= 0.72$) で頭打ちとなる。この時の $\frac{T_c - T_a}{I}$ は, (2) より $(1 - F') \{(T_{cm} - T_a)/I\}$ で与えられ, プレートファクター F' の影響が表われている。これは $m \rightarrow \infty$ とした時, 流管の温度は $T_i (= T_a)$ に近づいても, それに付随するフィンの部分は流管の温度より若干高めである事が原因と考えられる。この事から, 集熱板平均温度 T_c を使って実験的に効率曲線を求める場合には, その測定に充分注意する必要があると思われる。又, 瞬時効率の最大値が η_{op} だけではなく, F' にも大きく影響される事から, コレクター設計の際のプレートファクター F' の見積もりも充分注意すべきであろう。図 2 b は, (3)(6)(7)を使って算出した効率曲線を示す。やはり効率 η の最大値は $F' \eta_{op}$ で与えられるが, この事は式からも明らかである。

図 2 c は, (6), (10)(11)を使い, 横軸を $(T_0 - T_a)/I$ としたものであるが, この曲線は先の図 2 a, b とは違い, 直線とはなっていない。上限温度 T_{cm} 近くで, 急激に効率の低下が見られるのが特徴である。これは, この部分での流量が非常に小さい為, $(10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ kg/s})$, 热媒体がほぼ上限温度にまで達してからコレクターから流出する事を示している。この事から, 热媒体出口温度 T_0 を使って効率曲線を得る場合には, 流量が非常に小さい時の計測に充分の注意が必要である事を示唆している。

実際にコレクターが使用される時には, 流量 m と热媒体出口温度 T_0 が大きな興味の対象であり, 直観にも訴え易い事を考え, 以下のエクセルギー効率計算には, 横軸として $(T_0 - T_a)/I$ を使って議論を展開する。

図 3 には, 日射量 $I = 300 \sim 1,100 \text{ W/m}^2$ の 9 種類に対して行った瞬時エクセルギー効率 η_{ex} の計算結果を

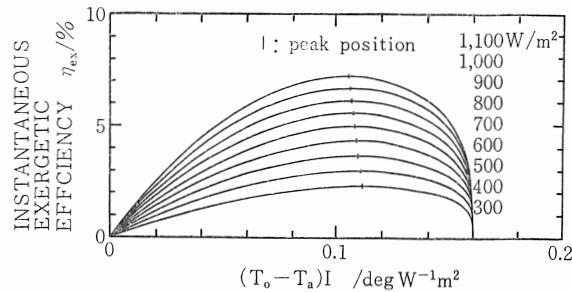


図 3 いくつかの日射量に於ける瞬時エクセルギー効率曲線

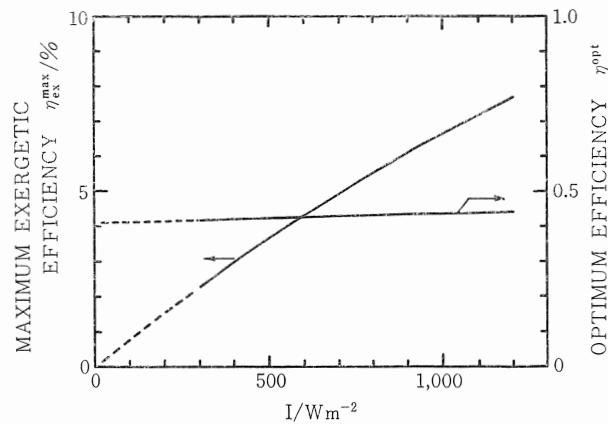


図 4 最大瞬時エクセルギー効率 η_{ex}^{\max} とその時の最適瞬時効率 η^{opt} の日射量依存性

示す。図 2 に示した瞬時エネルギー効率曲線と違い, 瞬時エクセルギー効率 η_{ex} は日射量に依存するのがわかる。又, 最大瞬時エクセルギー効率 η_{ex}^{\max} を与えるピークは, 日射量が大きくなるに従って左側にシフトしてはいるが, 横軸の位置にはそれ程大きな変化は見られない。これらの η_{ex}^{\max} の位置は, (24) で表された最適出口温度 $T_{0, opt}$ と一致する。

図 4 には, 最大瞬時エクセルギー効率 η_{ex}^{\max} とその時の最適瞬時効率 η^{opt} の日射量依存性を示す。図 3 に於ける $(T_{0, opt} - T_a)/I$ がほぼ一定である事から, η^{opt} にも大きな変化が見られないのがわかる。ここで, $I = 300 \sim 1,100 \text{ W/m}^2$ の間で瞬時効率 η が近似的に 0.43 で一定であるとしてみる。この事は, $(T_{0, opt} - T_a)/I$ を一定とする事にも等しい。先に $T_i = T_a$ の際には, 瞬時効率 η が質量流量 m のみの関数となる事を述べた。即ち, η を近似的にも一定とすれば, 質量流量 m も一意に求まる事を示している。式で表わせば,

$$\eta = \eta_{op} \frac{cm}{S_p U} \left\{ 1 - \exp \left(-F' \frac{S_p U}{cm} \right) \right\} \dots \dots \dots (28)$$

であり, 上式より, $\eta^{opt} = 0.43$ として数値的に解く事により, $(m/S_p)^{opt} \simeq 0.94 \times 10^{-3} \text{ kg/s/m}^2$ が得られる。

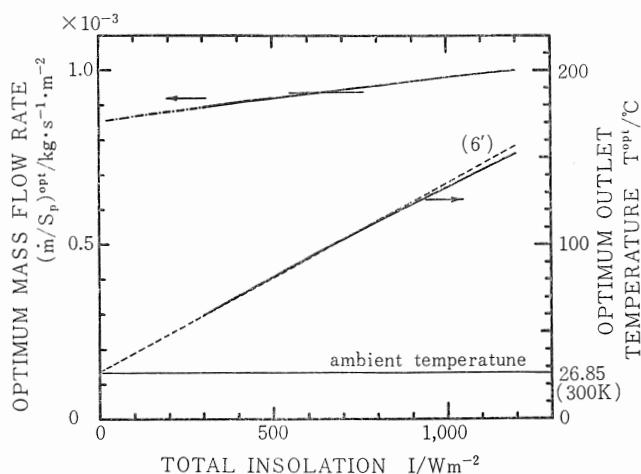


図 5 集熱板単位面積当たりの最適質量と最適出口温度の日射量依存性

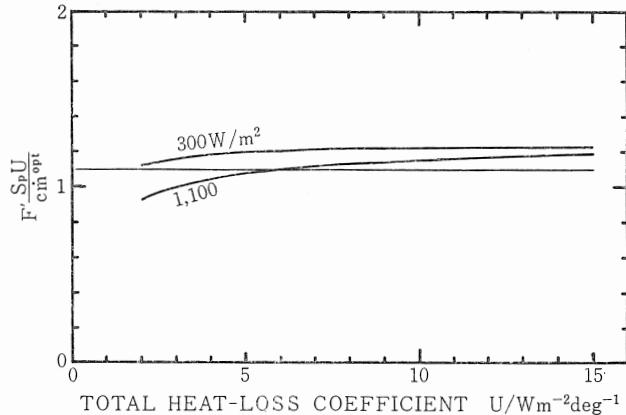


図 6 最適無次元数 $F' \cdot \frac{S_p U}{cm^3 opt}$ の全熱損失係数依存性

図 5 には (24) 及び (25) から得られる最適出口温度 T_{0opt} と集熱板単位面積当たりの最適質量流量 $(\dot{m}/S_p)_{opt}$ を示す。 $\eta=0.43$ として計算された $(\dot{m}/S_p)_{opt}=0.94 \times 10^{-3} \text{ kg/s/m}^2$ が、300~1100 W/m² の間の日射量範囲の平均値附近に位置しており、予測通り大きな変化は見られない。 T_{0opt} に関しては (6)において $T_i=T_a$ とおくと

$$T_{0opt} - T_i = \eta_{op} \frac{1}{S_p U} \left\{ 1 - \exp \left(-F' \frac{U}{c(\dot{m}/S_p)_{opt}} \right) \right\} S_r I \quad \dots \dots \dots (6')$$

となり。 $(\dot{m}/S_p)_{opt}$ が一定であれば最適出口温度 T_{0opt} は日射量に比例する事がわかる。図中の点線は先の近似値より (6')によって求めた直線であり、 T_{0opt} が日射量に対して良く比例しているのがわかる。これらの事は、 $(\dot{m}/S_p)_{opt}$ を一日の集熱時間内で一定値に維持するだけで、そのコレクターの最適使用状態もほぼ維持できる事を示している。

$(\dot{m}/S_p)_{opt}$ が近似的に一定であると見なせるのなら

は、(25)に於ける対数項 $\ln((T_c^m - T_i)/(T_c^m - T_0))$ も近似的に一定の値になると考えられる。数値計算の結果、この対数項内が 3 附近である事から、その周りでテイラー展開を行い、2次の項まで取り、(10)を使って(25)に代入すれば近似式として、

$$\begin{aligned} \ln 3 + \frac{1}{3} \left\{ \exp \left(F' \frac{U}{c(\dot{m}/S_p)_{opt}} \right) - 3 \right\} \\ = F' \frac{U}{c(\dot{m}/S_p)_{opt}} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (29)$$

が得られる。これを数値的に解けば、

$$F' \frac{U}{c(\dot{m}/S_p)_{opt}} \approx 1.10 \quad \dots \dots \dots (30)$$

が得られる。

(30)は $U = 5 \text{ W/m}^2$ に於ける近似値として得られたのであるが、図 6 には、 U をパラメーターとした $F' U / c(\dot{m}/S_p)_{opt}$ の変化を示す。日射量 $I=300 \sim 1100 \text{ W/m}^2$ の範囲で、(30)の無次元数が大体 1.1~1.2 の間にあるのがわかる。即ち、通常の平板型コレクターに於いて、最大瞬時エクセルギー効率 η_{exmax} は、 $F' U / c(\dot{m}/S_p)_{opt}$ がほぼ一定値 ($=1.1 \sim 1.2$) の時に得られ、その時の最適流量 m_{opt} は、集熱板面積 S_p 、全熱損失係数 U 、及びプレートファクター F' から、一日を通じた最適流量として概算できる事がわかる。

6. 全体の考察とまとめ

本研究と同様な数値計算は Bejan ら⁴⁾、及び藤原ら⁵⁾によって行われているが、何れも数値計算を主としたもので、具体的な条件式の導出迄は至っていない。本研究に於ける結果として、最適出口温度が満たすべき条件式及びその適用範囲が明らかとなった。これから得られる結果は、Bejan ら⁴⁾及び藤原ら⁵⁾が指摘した最高エクセルギー効率値よりは低い値を示すがAPP.)、より実用的な結果として得られたものと考えられる。即ち、出来るだけ流量を大きくした方がエクセルギー的に高い値を示しても、温度が伴なわなければあまり意味のあるものとは言えない。電気に例えれば、いくらパワーが大きくとも、電圧があまりに低ければ実用的でない事に等しい。この場合には、エネルギーの質は低くとも、量が大きいためにエクセルギー的に大きな値を示しているものと考えられる。この質と量の評価の間でどこに線を引くかについては別の因子（例えば、目的等）が加わる事で決定されるものと考えられる。

更に、数値計算の結果、(24)から得られる最大瞬時エクセルギー効率は日射の変動に対して変動するもの

の、その時瞬時エネルギー効率、及び(30)の無次元数 $F'U/c (m/S_p)^{opt}$ が $T_i=T_a$ の条件でほぼ一定に保たれる事が明らかとなった。特に、この無次元数がほぼ一定であるという事は、最適質量流量 m^{opt} がコレクターの特性を表わす重要な定数である全熱損失係数 U にほぼ比例する事を表わしており、数多くの U の違ったコレクターに対し最適流量の目安を与えるものと考えられる。更に、ある定まった U を持つコレクターに対し、入口温度 T_i が外気温と等しい場合には最適質量流量をほぼ一定に保つだけで、そのコレクターの最適化がほぼ行われる事を意味し、最適化制御の簡素化に繋がるものと思われる。

エクセルギーの考え方は、外界の環境を規準にして仕事の可能量を表わすものである。その意味で通常の給湯用コレクターの最適給湯条件に対しては本研究は目的を異にしている。温度のみが目的の場合には、やはりエネルギー効率の高い状態で使用するのが量的に得である事は明白である。しかし、あるコレクターの持つ潜在的な能力を示すという事で、このエクセルギーの概念は意味のあるところである。これは、目的とする使用温度によってコレクターの必要性能に対して指針を与える、経済的にバランスのとれたコレクター設計を可能にすると考えられる。

本研究に於ける解析は、できるだけ一般性を失なわないように進めた為、集光型コレクターに対しても、ある程度適用できるものと思われる。勿論その場合は利用温度が非常に高い時には(1')の熱損失の項が違ったものとなるので、必然的に結果も多少違ったものになると思われる。

謝 辞

本研究を進める上で、理論的な議論を賜わりました上智大学物理学科 押田勇雄教授に深く御礼申し上げます。更に本研究の機会を与えて下さいました㈱国城金型工業 平松 保社長にも心から御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) F. Kreith and J. F. Kreider ; "Principles of Solar Engineering", McGraw Hill, (1978)
- 2) J. A. Duffie and W. A. Beckman ; "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley & Sons, (1974)
- 3) F. Winter ; Solar Energy, 17 (1975) 335
- 4) A. Bejan, D. W. Kearney, and F. Kreith ; J. Solar Energy Eng., 103 (1981) 23
- 5) 藤原正純ら：第7回日本太陽エネルギー学会講演論文集 (1981) 69
- 6) エネルギー変換懇話会編：“総合エネルギー講座 第2巻 エネルギー基礎工学”，オーム社 (1979) 53
- 7) M. Kovarik and P. F. Lesse ; Solar Energy, 18 (1976) 431
- 8) C. B. Winn and D. E. Hull III ; Solar Energy, 23 (1979) 529
- 9) 高橋秀俊：応用物理 48 (1979) 745
- 10) 押田勇雄：第2回日本太陽エネルギー学会講演論文集 (1976) 69
APP.) 別号に独立掲載予定

(昭和57年8月4日 原稿受理)