

半円集光減圧管式太陽集熱器の理論解析

Theoretical analysis of a semi-circular concentrating,
partially evacuated tubular solar collector

橋 本 俊 行*
Toshiyuki HASHIMOTO

宮 武 修**
Osamu MIYATAKE

澄 田 誠***
Makoto SUMIDA

Abstract

This paper describes the analytical study of a semi-circular concentrating, partially evacuated tubular collector. This collector mainly consists of a glass tube and an absorber enclosed in the glass tube, the outer surface of which is silvered, is made to be a cylindrical mirror. The sunlight passing through the upper half of the glass tube arrives at the absorber, directly or after the reflection by the mirror. The absorber consists of a single absorbing tube and an absorbing fin attached to the bottom of the tube. The pressure of the gas confined in the glass tube is reduced so that the convection is fully suppressed.

Numerical calculations were performed to analyze the optical efficiency, heat loss coefficient and extraction efficiency of the collector.

The results show that the maximum optical efficiency is attained when the top of the absorbing tube is placed above the center of the glass tube. On the other hand, the lower the absorbing tube is placed, the lower heat loss coefficient is obtained. Therefore, the nearly maximum extraction efficiency may be obtained when the top of the absorbing tube is placed at the center of the glass tube. In addition, the shorter the distance from the end of the fin to the glass tube, the higher optical efficiency and the lower heat loss coefficient are obtained. The extraction efficiency is only a little dependent on the distance when air is confined in the glass tube. On the other hand, it increases with the decrease of the distance when krypton or xenon is confined in the glass tube.

It may be concluded that the collector is available at the temperature higher than 100°C when a low conductive gas is confined in the glass tube.

Key Words Tubular Collector, Semi-circular Concentrating, Partial Evacuation, No Convection, Low Conductive Gas, High Extraction Efficiency, Theoretical Analysis

1. 緒 言

既報¹⁾の研究において、半円集光減圧管式太陽集熱器の基本原理解を提案し、室内実験によってその熱損失の小さいことを確認した。この集熱器の特長は、光学的にはガラス管外面に直接銀処理した半円鏡による集光方式にあり、熱的にはガラス管内の封入気体が連続体で静止する程度に減圧し熱伝達を抑制することと、封入気体として空気だけでなく熱伝導率が小さく不活性なキセノンやクリプトンを用いることにある。この熱的特長は、一般論としては既に文献²⁾に詳しく、伝熱学的にも周知のことである。同様の考えで、二重円筒式集熱器³⁾と平板式集熱器⁴⁾に関して研究が行われているが、本研究はこれらとは異なる構造の集熱器

を対象とし、実用化のための具体的設計条件の解明を目的とするものである。本報では光学的、熱的に重要な因子である受光部断面の大きさと位置及び熱的に重要な因子である封入気体の違いが集熱器の光学効率、熱損失係数及び集熱効率に与える影響を理論的に検討し、本集熱器の合理的設計条件を明らかにする。なお、集熱器ガラス管軸方向を東西方向に設置することを理論解析の前提とする。

* 九州大学生産科学研究所 助手
Research Institute of Industrial Science, Kyushu University

** 九州大学生産科学研究所 教授
Research Institute of Industrial Science, Kyushu University, Professor

*** 東洋鋼板株式会社
TOYOKOHAN Co., LTD

2. 解析方法

2.1 解析系及び解析条件

本研究で対象とした半円集光減圧管式太陽集熱器の断面構造と解析に用いた座標系を図1に示す。ガラス管径が大きいほど集熱効率は向上すると考えられるので、本解析においては、現在集熱器用に市販されているものうち最大の径を持つガラス管（外半径 $R_3 = 50$ mm, 内半径 $R_2 = 48$ mm）を対象とした。実際の集熱器では複数管を並べるが、本解析では単管を対象とする。複数管を設置した時の隣接管による反射光の影響は微小で無視できることが山東ら⁵⁾によって指摘されている。

ガラス管に内包された受光部は、熱媒体の通る管すなわち集熱管とその下側のフィンとから成る。

集熱器外半径 R_1 の大きさは、次の理由により7.5, 9.0, 10.5 mm の三通りとした。 R_1 は熱媒が水の場合の実用器（集熱管が二重管の日本電気硝子（株）製真空管式集熱器で R_1 が6.35 mm）よりも大きめに設定した。本集熱器は 100°C 以上での利用を目的として熱媒が油の場合を想定している。油の粘度は水よりも大幅に大きく流動抵抗の増大が予想されるので R_1 を大きくした。また R_1 が大きくなりすぎると熱損失の増大が容易に予想されることと、ガラス管端部を貫通する際に R_1 が大きすぎることは現実的でないことから $R_1 \leq 10.5$ mm に設定した。

ガラス管外表面の下半周部分は銀蒸着あるいは銀メッキがなされており、ガラス管下半部が半円筒の裏面鏡になっている。太陽光はガラス管上半部から入射して、開口面を通り、受光部の表面、すなわち受光面に直接入射するか、ガラス管下半部の半円鏡で反射されて受光面に入射する。ここで開口面とは、半円鏡のガラス管軸に平行な両端の二辺とその辺の端点同志を結んでできる二辺とから成る長方形 ($2R_3 \times$ 半円鏡の管軸方向長さ) を指すものとする。ガラス管内の封入気体としては、空気もしくはより低熱伝導率のクリプトン、キセノンを用いる。この場合、空気で3 kPa 以下、キセノンで1.5 kPa 以下の程度に減圧すれば封入気体の対流が停止する¹⁾。本解析ではガラス管内の封入気体の対流が停止している場合を対象とする。受光面温度 T_p は一定であり、ガラス管温度 T_g も一定で外気温度 T_a に等しいとする。 $T_g = T_a$ の条件を与えることは、ガラス管と外気との熱伝達係数を無限大とみなして熱損失を大きめ、すなわち安全側に見積ることに相当する。

またこの条件は実際の条件にも近い。文献1)の結

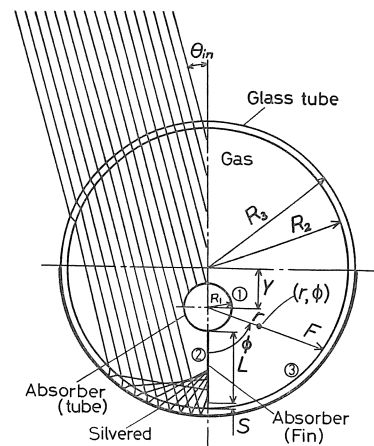


図1 集熱器の断面構造

果から、 $(T_g - T_a)/(T_p - T_a)$ の値は、空気の場合で0.1、キセノンの場合で0.01程度と小さく、更に天空放射によって T_g は T_a に近くなる。一方 T_g が T_a より小さくなる程度は一例 ($T_a = 20^\circ\text{C}$, 風速 2 m/s, 天空温度 $(T_a - 6)^\circ\text{C}$) の計算で 0.3°C でしかない。したがって $T_g = T_a$ の条件は実際的にも妥当である。

本解析ではすべて $T_a = 20^\circ\text{C}$ とした。

なおフィンを集熱器の上側にもつけることが考えられるが、フィンを上下につけることは工作上複雑なので、本解析ではその場合を対象としなかった。

解析に使用する座標系は、集熱管軸を一つの座標軸とする円柱座標系である。図1に示したように、集熱管軸に垂直な半径方向座標を r 、集熱管軸回りの周方向座標を ϕ とする。

2.2 光学効率の計算方法

光学効率 η_{opt} を、開口面に単位時間に入射する太陽光エネルギー(開口面日射量 $J \times$ 開口面積)に対する受光面で熱に変換される太陽光エネルギーの割合として定義する。 J は太陽光の、開口面に垂直な方向成分の強度である。図1に示す入射太陽光の軌跡を追跡する計算によって η_{opt} を求める。解析方法は以下の通りである。太陽光の方向と管軸とのなす角度 β が $\pi/2$ の場合のみ対象とする。受光面がガラス管内半径と同じ長さの平板でガラス管内面が銀面 ($R_1 = 0, Y = 0, R_2 = R_3$) の条件で計算された山東らの結果⁶⁾ によれば、 η_{opt} は $\beta = \pi/2$ の時に比べて $\beta = \pi/3$ で1.6%減、 $\beta = 2\pi/9$ で6.1%減にしかならない。したがって、集熱可能な時間帯の大部分について本解析は有効である。集熱器は管軸方向に十分長く、端効果は無視できるものとする。したがって、管軸方向の変化は無視でき、解析はすべて2次元の座標 (r, ϕ) を用いて行うことができる。また太陽光はすべて直達光として

取り扱う。解析上、開口面に入射する太陽光を 200 分割する。分割された各々の太陽光についてその強度の減衰は、ガラス管を透過する時、半円鏡で反射する時及び受光面で吸収される時に生じるので、以下各段階における減衰について検討する。なお、ガラス管内の封入気体による太陽光の吸収は無視する。

ガラス管の総透過率

すでに我が国において量販されている低鉄分ソーダライムガラス製の集熱器用ガラス管では、ガラスの吸収による太陽光の減衰は 1% 以下である。このガラス管の使用を想定して、本解析ではガラスによる太陽光の吸収は無視する。この時、入射光の減衰はガラス管の内外面における反射によって生じる。ガラス内で多重反射してガラス管内へ再入射してくる光の強度は、入射光の強度に対して 0.2% 程度なので、本解析ではこれを無視する。各面での反射は良く知られた方法⁷⁾で容易に計算される(計算の詳細は付録(A)を参照)。なお気体の屈折率は 1、ガラスの屈折率は 1.52 とした。以上の計算によって得られるガラス管の総透過率を τ とする。

半円鏡の総反射率

図 2 に近似的取り扱いのモデルを示す。半円鏡に強度 J_{in} で入射した光は多重反射を行うが、図 2(a) のように強度 J_1, J_2, J_3 (計算の詳細は付録(B)を参照)の反射光が無視できないと考えられる。これらの各々について別々に光路追跡を行うことは繁雑なので、図 2(b) のように強度が $J_1 + J_2 + J_3$ の 1 本の反射光が得られるというように簡単化することになると、半円鏡の総反射率は次式で表される。

$$\rho = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_{in}} \dots \dots \dots (1)$$

なおガラスと銀の界面での反射率は 0.98 とする。

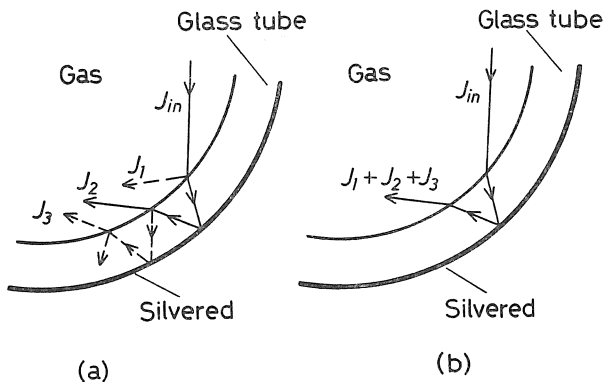


図 2 半円鏡の入射光と反射光

受光面の吸収率

受光面が選択吸収膜で被覆されている場合を想定する。ブラッククロム製選択吸収膜の太陽光吸収率が恵ら⁸⁾によって実測されている。この実測値と良く一致するような次式を仮定し、計算に用いた。

$$\alpha = \begin{cases} 0.90 - \frac{0.18}{\pi} \psi_{in} & (0 \leq \psi_{in} \leq \frac{2}{9}\pi) \\ 0.86 - \frac{0.09}{\pi} (\psi_{in} - \frac{2}{9}\pi) \exp\left\{ \frac{12.7}{\pi} (\psi_{in} - \frac{2}{9}\pi) \right\} & (\frac{2}{9}\pi \leq \psi_{in} \leq \frac{\pi}{2}) \end{cases} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 ψ_{in} は受光面入射角である。

光学効率の計算方法

単位時間に集熱器開口面に入射する単位大きさのエネルギーを持つ入射光を 200 分割した各々の太陽光について、受光面で熱に変換されるエネルギーは、

$$(1/200) \tau \rho \alpha$$

となる。ただし、受光面に直接入射する場合は $\rho = 1$ とする。分割された各々の太陽光について計算されたこの値をすべて加え合わせれば、その値が光学効率 η_{opt} になる。

2.3 熱損失係数の計算方法

開口面積基準の熱損失係数 U を次式で定義する。

$$U = \frac{Q}{2R_3(T_p - T_a)} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 Q は管軸方向単位長さあたりの集熱器の熱損失である。以下に Q の解析方法について述べる。

本集熱器では、封入気体は連続体でその対流が生じない程度にガラス管内を減圧するので、そこでの伝熱機構は静止気体の熱伝導と放射伝熱とから成る単純な機構である。また、解析条件より $T_g = T_a$ だから、受光面とガラス管との間の温度関係のみで伝熱量を決定できる。受光面とガラス管の温度がそれぞれ一定なので、熱放射と熱伝導による伝熱量は独立に計算できる。すなわち Q は次式で表される。

$$Q = Q_{rad} + Q_{ca} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 Q_{rad} は受光面からガラス管への管軸方向単位長さあたりの放射伝熱量、 Q_{ca} は受光面からガラス管への管軸方向単位長さあたりの伝導伝熱量である。図 1 に解析系と同時に示した座標系に基づいて以下の解析を行う。

放射伝熱量の計算

面①を集熱管表面、面②をフィン表面、面③をガラス管の内面とする。面によって囲まれた閉空間におけ

表1 気体の熱伝導率の式(7)における係数值

	a	b	c
Air	-0.338×10^{-7}	0.7910×10^{-4}	0.2403×10^{-1}
Krypton	-0.131×10^{-7}	0.2981×10^{-4}	0.8729×10^{-2}
Xenon	0	0.1689×10^{-4}	0.5263×10^{-2}

る放射伝熱の解析方法⁹⁾から、 Q_{rad} は次式で表される。

$$Q_{rad} = 2\pi R_2 \cdot \frac{\epsilon_g}{1-\epsilon_g} \{ \sigma(T_g + 273.15)^4 - q_r \} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 ϵ_g はガラス表面の放射率で 0.90 の一定値とする。 σ はステファン・ボルツマン定数である。式(5) 右辺に含まれる q_r の計算式を付録に記す。

伝導伝熱量の計算

2次元定常熱伝導の基礎方程式は次式で表される。

$$r^+ \frac{\partial}{\partial r^+} \left(\lambda r^+ \frac{\partial T}{\partial r^+} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) = 0 \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 $r^+ = r/R_1$ 、 T は気体の温度、 λ は気体の熱伝導率である。本解析では λ は温度のみの関数とし、次式で与える。

$$\lambda = c + bT + aT^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

解析の対象とした空気、クリプトン、キセノンについて係数 a, b, c の値を表1に示す。これらの値は空気については文献¹⁰⁾、クリプトン及びキセノンについては文献¹¹⁾の結果を用いて最小自乗法により得たものである。

図1に示した解析系は中心線に関して対称なので、解析は $0 \leq \phi \leq \pi$ を対象とする。この時、境界条件は次のように記述される。

受光面上で、

$$T = T_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

ガラス面上で、

$$T = T_g \quad \dots\dots\dots(9)$$

中心線上で、

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

更に新たな変数 E^* と座標 (η, ϕ) を導入することにより、式(6)は最終的に次式で表される。

$$\left\{ \left(\frac{1}{l_n F^+} \right)^2 + 3 \left(\frac{\partial \eta}{\partial \phi} \right)^2 \right\} \frac{\partial^2 E^*}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \phi^2} \cdot \frac{\partial E^*}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 E^*}{\partial \phi^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} E^* &= \int_{T_g}^T \lambda dT / \int_{T_g}^{T_p} \lambda dT, \quad \eta = \frac{l_n r^+}{l_n F^+} \\ F^+ &= \frac{F}{R_1} = -\cos \phi + \sqrt{(R_2/R_1)^2 - \sin^2 \phi} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

境界条件の式(8)~(10)は、

受光面上で、

$$E^* = 1 \quad \dots\dots\dots(13)$$

ガラス面上で、

$$E^* = 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

中心線上で、

$$\frac{\partial E^*}{\partial \phi} = 0 \quad \dots\dots\dots(15)$$

となる。

次に解法について述べる。 $0 \leq \eta \leq 1, 0 \leq \phi \leq \pi$ の領域で η, ϕ を等間隔格子に分割し、式(11)を中心差分法によって差分し、反復法を用いて解く。座標 (η, ϕ) の分割数は $80 \times 80 (S > 4 \text{ mm}), 160 \times 160 (S \leq 4 \text{ mm})$ であり、この分割数を用いると十分な精度で数値が得られることを確認している。 S は図1に示すように、フィン先端とガラス管とのすきまの大きさである。 E^* の数値解と次式より、伝導伝熱量 Q_{ca} が計算できる。

$$\begin{aligned} Q_{ca} &= -2 \int_0^\pi \left(\lambda r^+ \frac{\partial T}{\partial r^+} \right)_{r^+=1} d\phi \\ &= -2 \int_{T_g}^{T_p} \lambda dT \int_0^\pi \left(\frac{1}{l_n F^+} \cdot \frac{\partial E^*}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} d\phi \quad \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

2.4 集熱効率

集熱効率 η を、集熱器開口面に単位時間に入射する太陽光エネルギー(開口面日射量 $J \times$ 開口面積)に対する受光面が単位時間に取得するエネルギーの割合として定義すれば、 η は次式で表される。

$$\eta = \eta_{opt} - U(T_p - T_a) / J \quad \dots\dots\dots(17)$$

したがって、光学効率 η_{opt} 及び熱損失係数 U を上述の方法により算定すれば、 η が求まる。本研究では集熱器の最終的性能評価をこの η で行う。

3. 解析結果及び検討

3.1 光学効率

集熱管の位置の影響

光学効率 η_{opt} と集熱管とガラス管の両管軸間の距離 Y との関係を図3に示す。この関係曲線がなめらかでないのは、集熱器入射光の分割数が有限であるための計算精度上の問題に起因しているが、それは η_{opt} の検討にはさしつかえない程度である。この図において、 η_{opt} が Y によってあまり変化しない範囲での η_{opt} の値は集熱管外半径 R_1 にほとんど依存していない。また図4より分かるように、 $Y \leq R_1$ の範囲では R_1 を更に小さくしても、直接受光面に入射せずいったん半円鏡

に反射されて受光面に入射する光の割合が若干増加するだけである。従って $Y \leq R_1$ の範囲での η_{opt} の値は R_1 によってあまり変わらないと推察される。この範囲で Y が増加すると η_{opt} が緩やかに上昇するのは、受光面入射角 ψ_{in} が 0 に近くなる光線が増えて、式 (2) で示されるように吸収率 α が増加するためである。

Y がある値より大きくなる、すなわち集熱管がある位置より下がると η_{opt} が急減する。この原因は、図 4 で集熱管を下げた場合を仮想してみると分かるように、半円鏡を反射した光のうちもっとも強度の大きくなる部分が受光面をそれるようになるからである。 η_{opt} が急減し始める Y の値は、集熱器入射角 θ_{in} が大きく、集熱管外半径 R_1 が小さいほど半円鏡からの反射光が受光面に入射しにくくなるため、小さくなる。集熱器を東西方向に固定設置する場合に必要な $\theta_{in} \leq \pi/4$ 程度の範囲においても、 $Y \leq R_1$ の範囲にあれば η_{opt} はほぼ最大値をとる。

θ_{in} が大きいほど η_{opt} が大きくなるのは、集熱器入射光のうち半円鏡に入射せず直接受光面に入射する光の割合が多くなるため、反射による損失が少なくなるからである。ただし、 Y のある値以上で η_{opt} が急減し始める範囲では、 θ_{in} が大きいほど η_{opt} は急激に小さくなる。

フィン先端すきまの影響

光学効率 η_{opt} とフィン先端とガラス管とのすきまの大きさ S との関係を実験した結果を図 5 に示す。 S が大きくなるにつれて、 η_{opt} はほぼ一定の割合で減少する。図 4 に見られるように、フィン先端近傍では半円鏡を反射した光が比較的一様に入射している。そのため、 S が大きくなるとフィンが短くなるので、漸次受光面をそれる光が増えてくる。

$\theta_{in} = \pi/6$ の場合の変化は特異的で、 S が大きくなるにつれて η_{opt} が急減する。これは、図 4 に見られるように、半円鏡を反射した光が S がフィン先端から 10 mm 以内の範囲に集中しており、 S が大きくなってフィンが短くなると、この集中した光が受光面をそれてしまうからである。

3.2 熱損失係数

集熱管の位置の影響

式 (3) で定義した熱損失係数 U と集熱管とガラス管の両管軸間の距離 Y との関係を図 6 に示す。 Y が大きくなるにつれて集熱管位置が下がってフィン長さが短くなるため、放熱面積が小さくなり U は緩やかに減

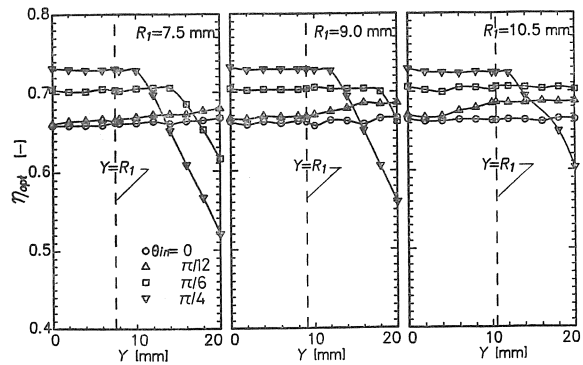


図 3 光学効率に及ぼす集熱管位置の影響 ($S=2\text{mm}$)

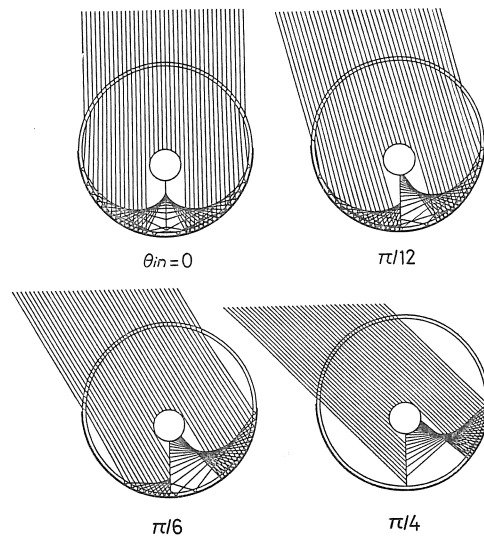


図 4 集熱器入射光の軌跡 ($Y=R_1, S=0$)

少する。また、管軸方向単位長さあたり受光面積は $Y=R_1$ の時、

$$2(1.14 R_1 + 46)$$

となつて、集熱管外半径 R_1 を変えてもあまり変わらないので、 U も R_1 変化の影響をあまり受けない。

封入気体を空気の代わりに、熱伝導率の小さいクリプトンもしくはキセノンにすると U が大きく低下する。すなわち、封入気体を低熱伝導率のものに変える

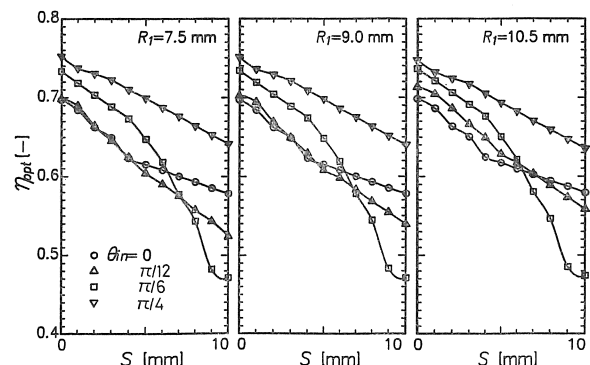


図 5 光学効率に及ぼすフィン先端すきまの影響 ($Y=R_1$)

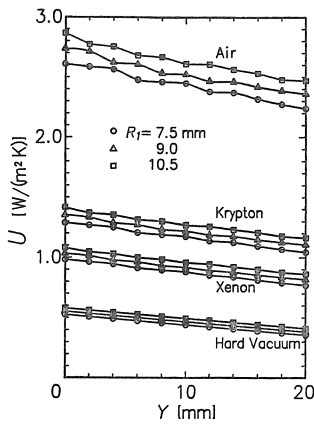


図6 熱損失係数に及ぼす集熱管位置の影響 (S=2mm, T_p=100°C)

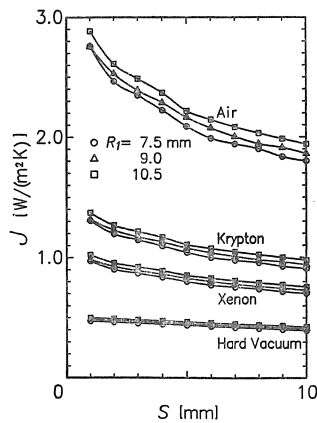


図7 熱損失係数に及ぼすフィン先端すきまの影響 (Y=R₁, T_p=100°C)

ことはUの低減にとってきわめて有効である。
 なお、図6でUが最小になっているHard vacuumの場合、すなわち高真空の場合の結果は、封入気体の熱伝導率を無視(λ=0)して計算したものである。

フィン先端すきまの影響

熱損失係数Uとフィン先端とガラス管とのすきまの大きさSとの関係を図7に示す。空気の場合はSを小さくするとUは急激に大きくなるが、クリプトンもしくはキセノンの場合にはそれほど大きくなる。これは、フィン先端とガラス面が近づくと熱伝導率の大きい気体の場合、熱伝導による熱損失が増すからである。また、集熱管外半径R₁の影響は小さい。

3.3 集熱効率

集熱器入射角θ_{in}=0の場合の集熱効率ηをη₀とする。θ_{in}≥0の場合の集熱効率は次式より計算できる。

$$\eta = \eta_0 + \Delta\eta \dots \dots \dots (18)$$

Δηの値を表2に示す。このΔηは各θ_{in}に対するη_{opt}の計算値からθ_{in}=0に対するη_{opt}の計算値を差し引いて得られる。また、光学効率η_{opt}の前述の検討よりY≤R₁の条件が推奨され(図3参照)、Yが大きい

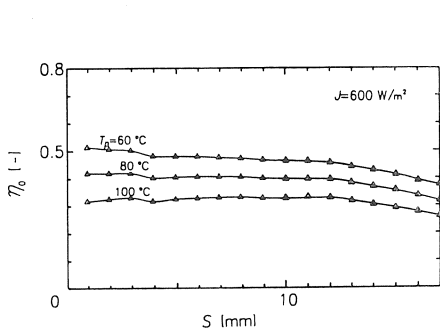


図8 集熱効率に及ぼすフィン先端すきまの影響 (封入気体が空気の場合, Y=R₁=9mm)

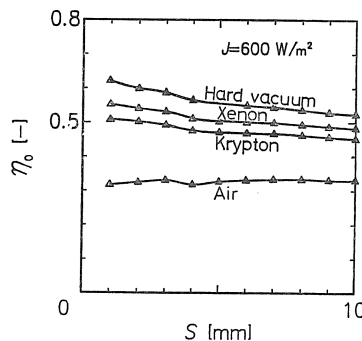


図9 集熱効率に及ぼすフィン先端すきまの影響 (Y=R₁=9mm, T_p=100°C)

表2 集熱器入射角θ_{in}≥0の集熱効率を計算する式(18)におけるΔηの値

θ _{in}	0	π/12	π/6	π/4
Δη	0	0.007	0.042	0.067

いほど熱損失係数Uは小さいので(図6参照)、以下の解析はY=R₁の場合のη₀を対象とする。ηはこのη₀と式(18)より計算できる。

まず空気の場合について、集熱効率η₀とフィン先端とガラス管とのすきまの大きさSとの関係を図8に示す。S≤11mmでは光学効率と熱損失の影響が相殺されて、いずれの受光面温度T_pでもSの変化によるη₀の変化は小さい。

S>11mmではη₀はSの増加につれて次第に小さくなる。フィンが小さいほど材料コストが小さくなるので、Sは11mm程度にするのが良い。クリプトン、キセノンの場合は、光学効率の影響がより大きいので、図9に示すように、Sを小さくした方がη₀は大

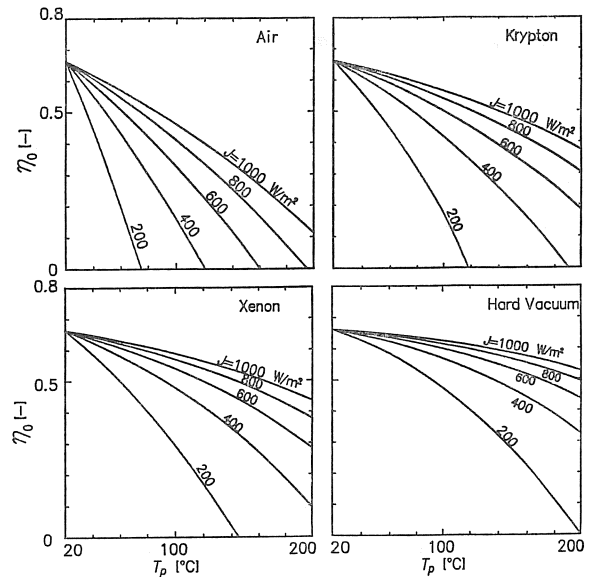


図10 集熱効率に及ぼす受光面温度の影響 (Y=R₁=9mm, L=28mm, S=2mm)

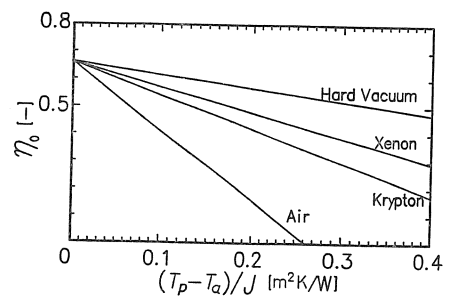


図11 集熱特性の一例 (Y=R₁=9mm, L=28mm, S=2mm, T_p=100°C)

きくなる。そこで以下の解析は、工作上 S を極端に小さくできないことも考慮して、すべて $S=2\text{ mm}$ の場合を解析の対象とする。

次に、開口面日射量 $J=600\text{ W/m}^2$ の条件で計算された集熱効率 η_0 と受光面温度 T_p との関係を、封入気体毎に図10に示す。この図より、本集熱器は封入気体が空気でも、 $J=600\text{ W/m}^2$ 、受光面温度 $T_p=100^\circ\text{C}$ で η_0 が30%程度と、相当の集熱可能性を持っていることが分かる。封入気体をより低熱伝導率のクリプトンやキセノンに置換すると、 η_0 は大幅に向上する。もちろんガラス管内を高真空 (Hard vacuum) にして気体の熱伝導が無視できる場合には、熱損失は放射伝熱のみによるので η_0 は最も大きい。ガラス管内にどの気体を封入するのか、あるいは高真空とするのかは、使用目的や製造コスト等との関連より選択されるべきである。参考までに図11に集熱特性の一般的なまとめ方である η_0 と $(T_p - T_a)/J$ の関係を、 $T_p=100^\circ\text{C}$ の場合について示した。ガラス管内の封入気体の違いによる η_0 の違いが明確に理解できる。

4. 結 言

半円集光減圧管式太陽集熱器について、受光部集熱管の外径と位置、フィン先端すきまの大きさ、封入気体の種類や受光面温度を変えて、光学効率、熱損失係数及び集熱効率を理論的に検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 集熱管外径の光学効率と熱損失係数に与える影響は小さい。
- (2) 集熱管上端がガラス管軸よりも上方 ($Y < R_1$) にあれば、光学効率はほぼ最高になる。また、集熱管位置が下がって Y が大きくなると、熱損失係数は緩やかに減少する。したがって集熱管上端がガラス管軸上 ($Y = R_1$) にあれば集熱効率はほぼ最高になる。
- (3) フィン先端とガラス管とのすきまの大きさ S が小さいほど、光学効率は向上し熱損失係数は増大する。封入気体が空気の場合、集熱効率は S がある値以下ではほぼ一定で、 S がある値を超えると次第に小さくなる。従って、材料コスト低減の観点から集熱効率が一定の範囲で S をできるだけ大きくするのが望ましい。クリプトンあるいはキセノンの場合には、 S が小さくなるにつれて集熱効率は向上するので、 S は出来るだけ小さい方が望ましいが、工作精度も考えると $S=2\text{ mm}$ 程度が現実的であろう。
- (4) 封入気体が空気の場合、開口面日射量 600 W

$/\text{m}^2$ 、受光面温度 100°C で30%程度の集熱効率を得られる。封入気体をクリプトンあるいはキセノンに置換した場合、熱損失係数は著しく低減して集熱効率が大幅に向上するので、本集熱器を 100°C 以上で利用することも可能である。

付 録

(A) ガラス管の総透過率 τ の計算

以下 n は屈折率、添字 a は外気、 g は封入気体、 t はガラス管を意味する。ガラス管外面での光の入射角 θ_a は集熱器入射角 θ_{in} と入射位置とから、屈折角 θ_t はスネルの法則¹²⁾により、反射率 R_{at} は次式^{7),12)}により計算される。

$$2R_{at} = \left\{ \frac{-\sin(\theta_a - \theta_t)}{\sin(\theta_a + \theta_t)} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tan(\theta_a - \theta_t)}{\tan(\theta_a + \theta_t)} \right\}^2 \dots\dots\dots (A-1)$$

次に、ガラス管の肉厚と曲率及び θ_t から管内面での入射角が、式(A-1)の添字を変更した式から反射率 R_{tg} が計算される。ガラスによる吸収を無視するので、集熱器入射光の強度 J_{in} と最終的に管内へ抜ける光の強度の比として定義される τ は、次式により計算される。

$$\tau = J_{in}(1 - R_{at})(1 - R_{tg}) / J_{in} = (1 - R_{at})(1 - R_{tg}) \dots\dots\dots (A-2)$$

(B) 半円鏡における反射光強度の計算(図2参照)

半円鏡に強度 J_{in} の光が入射した時のガラス管内面での反射率が R_{gt} と計算されると

$$J_1 = J_{in} R_{gt} \dots\dots\dots (B-1)$$

となり、ガラス内へ進入する光の強度は $J_{in}(1 - R_{gt})$ となる。光の吸収を無視すると、一度銀面で反射され再度ガラス管内面へ入射する光の強度は $0.98 J_{in}(1 - R_{gt})$ となり、その時の反射率が R_{tg} とすれば

$$J_2 = 0.98 J_{in}(1 - R_{gt})(1 - R_{tg}) \dots\dots\dots (B-2)$$

反射光の強度は $0.98 J_{in}(1 - R_{gt}) R_{tg}$ だから、再度銀面で反射しガラス管内面へ入射する光の強度は $(0.98)^2 J_{in}(1 - R_{gt}) R_{tg}$ となり、その時の反射率を R'^{tg} とすれば

$$J_3 = (0.98)^2 J_{in}(1 - R_{gt}) R_{tg} (1 - R'^{tg}) \dots\dots\dots (B-3)$$

となる。

(C) 放射伝熱量の計算式(5)右辺に含まれる q_r の計算

$$q_r = \frac{1}{\det(a_{ij})} \cdot \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (C-1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} a_{ij} &= \frac{1}{1 - \varepsilon_i} \delta_{ij} - F_{ij} && (i=1 \sim 3, j=1 \sim 3) \\ b_i &= \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} \sigma (T_i + 273.15)^4, && \\ \delta_{ij} &= \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} && (C-2) \\ \varepsilon_i &= \begin{cases} \varepsilon_p & (i=1, 2) \\ \varepsilon_g & (i=3) \end{cases}, && T_i = \begin{cases} T_p & (i=1, 2) \\ T_g & (i=3) \end{cases} \end{aligned} \right\}$$

ただし、 ε_p は受光面(①及び②)の放射率で0.05の一定値とする。式(C-2)の F_{ij} は形態係数であり、次式で計算される。

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi} \left(L^+ - \sqrt{(1+L^+)^2 - 1} + \cos^{-1} \frac{1}{1+L^+} \right) \dots\dots\dots (C-3)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{11} &= 0, & F_{13} &= 1 - F_{12} \\ F_{21} &= \frac{A_1}{A_2} \cdot F_{12}, & F_{22} &= 0, & F_{23} &= 1 - F_{21} \\ F_{31} &= \frac{A_1}{A_3} F_{13}, & F_{32} &= \frac{A_2}{A_3} F_{23}, \\ & & F_{33} &= 1 - F_{31} - F_{32} \end{aligned} \right\} (C-4)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} L^+ &= \frac{L}{R_1}, & A_1 &= 2\pi R_1 \\ A_2 &= 2L, & A_3 &= 2\pi R_2 \end{aligned} \right\} (C-5)$$

使用記号

- F = 集熱管中心からガラス管内表面までの距離 [m]
- J = 開口面日射量 (入射太陽光の集熱器開口面に垂直な方向成分の強度) [W/m²]
- L = ガラス管軸と垂直方向の受光部フィン長さ [m]
- Q = 集熱器のガラス管軸方向単位長さあたりの全伝熱量 [W/m]
- Q_{ca} = 集熱器のガラス管軸方向単位長さあたりの伝導伝熱量 [W/m]
- Q_{rad} = 集熱器のガラス管軸方向単位長さあたりの放射伝熱量 [W/m]
- R_1 = 集熱管外半径 [m]
- R_2 = ガラス管内半径 [m]
- R_3 = ガラス管外半径 [m]
- r = 集熱管軸を基準とした円柱座標系の半径方向座標 [m]
- S = フィン先端すきまの大きさ (フィン先端からガラス管内面までの距離) $R_2 - (Y + R_1 + L)$ [m]
- T = 封入気体の温度 [°C]
- T_a = 集熱器周囲の外気温度 [°C]
- T_g = ガラス管温度 [°C]
- T_p = 受光面温度 [°C]
- U = 熱損失係数 [W/(m²·K)]
- Y = 集熱管軸からガラス管軸までの距離 [m]
- α = 受光面の吸収率 [-]
- ε_g = ガラス表面の放射率 [-]
- ε_p = 受光面の放射率 [-]
- η = 集熱効率 [-]
- η_0 = 集熱器入射角 $\theta_{in} = 0$ の場合の集熱効率 [-]
- η_{opt} = 光学効率 [-]
- θ_{in} = 集熱器入射角 [rad]
- λ = 封入気体の熱伝導率 [W/(m·K)]
- ρ = 半円鏡の総反射率 [-]

- σ = ステファン・ボルツマン定数 (= 5.67×10^{-8}) [W/(m²·K⁴)]
- τ = ガラス管の総透過率 [-]
- ϕ = 集熱管軸を基準とした円柱座標系の周方向座標 [rad]

ただし、図中では R_1, S, Y の単位は [mm] で表した。

参 考 文 献

- 1) 橋本俊行・宮武修・原田照利・芥川竜太郎・麻生智倫, 半円集光減圧管式太陽集熱器の研究, 太陽エネルギー, 10 (1984), No.6, 27
- 2) Meinel A. B. and M. P. Meinel, Applied Solar Energy (1976), pp.335-344, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA
- 3) Ratzel A. C. and C. E. Simpson, Heat loss Reduction Techniques for Annular Solar Receiver Designs, SAND 78-1769 (1979), Sandia Lab., NM, USA
- 4) Waal H. de and F. Simonis, Development of a Selective Surface Vacuum Collector, Commission of the EC contract No. 526-78-1 ESNL Final Rep. (1980), Netherlands
- 5) 山東陸夫・藤井篤・野口哲男・外山茂樹, 真空ガラス管型集熱器の有効透過吸収係数に関する理論解析, 太陽エネルギー, 10 (1984), No.6, 34
- 6) 山東陸夫・藤井篤・種村栄・野口哲男, 管型集熱器の入射角補正因子の測定法に関する考察, 日本太陽エネルギー学会第10回研究発表会講演論文集 (1984), 129
- 7) 辻内順平, 光学概論 (1979), p.29, 朝倉書店, 東京
- 8) 憲昭彦・溝呂木広次・中村一男, 太陽熱選択吸収膜被覆金属箔, 真空, 25 (1982), 225
- 9) Siegel R. and J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer (1972), p.240, McGraw-Hill, New York
- 10) 日本機械学会編, 流体の熱物性値集 (1983), p.189, 日本機械学会, 東京
- 11) Hanley, H. J. M., The Viscosity and Thermal Conductivity Coefficients of Dilute Argon, Krypton, and Xenon, J. Phy. Chem. Ref. Data, 2 (1973), 619
- 12) ソル・ウィーダー, 太陽エネルギー入門 (1983), pp.105-109, ワイリー・ジャパン, 東京

(昭和61年10月30日 原稿受理)