

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

Theoretical Analysis on the Effective Transmission-Absorption Factor of an Evacuated tubular collector

山 東 陸 夫*
Mutsuo SANDO

藤 井 篤*
Atsushi FUJII

野 口 哲 男**
Tetsuo NOGUCHI

外 山 茂 樹***
Sigeki TOYAMA

Abstract

The effective transmission-absorption factor $(\tau\alpha)_e$ of an evacuated tubular collector which has a flat absorber plate within each tube and a reflecting plate behind a set of parallel tubes is composed of following three dominant factors.

- 1) The factor $(\tau\alpha)_d$ regarding to the absorption of solar radiation which directly transmits the glass tube onto the front surface of absorber plate.
- 2) The factor $(\tau\alpha)_b$ regarding to the radiation which passes through the space between absorber plates and is reflected to the back surface of absorber plate.
- 3) The factor $(\tau\alpha)_t$ regarding to the radiation which is reflected from the neighbouring tubes to the absorber plate.

These factors were theoretically formulated, by describing the direction of incident radiation as a function of polar angle θ and azimuth angle φ on the collector. The calculated value of these factors showed a complicated incident angle dependency. The factor $(\tau\alpha)_b$ of the collector with a flat mirror reflector dominantly depended on the angle θ' which is a projection of angle θ onto the plane perpendicular to the tube.

Key Words : Effective transmission-absorption factor, Incident angle dependency, Evacuated tubular collector, Theoretical analysis

和 文 抄 録

平らな集熱板を持ち、背後に平らな反射板を取付けた真空ガラス管型集熱器の有効透過吸収係数 $(\tau\alpha)_e$ は、次の3つの主要な項から構成される。

- 1) ガラス管を直接透過して集熱板の表面で太陽光が吸収されることによる項 $(\tau\alpha)_d$
 - 2) 隣合う集熱板の間を通り、反射板により反射された光が集熱板の裏面に吸収されることによる項 $(\tau\alpha)_b$
 - 3) 隣接するガラス管の表面で反射された光が集熱板の表面に吸収されることによる項 $(\tau\alpha)_t$
- 入射光の方向を集熱器に対する天頂角 θ 及び方位角 φ により表し、これらの項を理論的に計算した。その結果、これらの項が複雑な入射角依存性を示し、反射板として平面鏡を取付けた場合、 $(\tau\alpha)_b$ は角 θ のガラス管に垂直な面への射影角 θ' に主に支配されることなどが明らかとなった。

1. 緒 言

太陽熱利用システムにおける光-熱変換器である集熱器の集熱効率の特性は、そのシステムの性能を決定する重要な因子である。一般的に、太陽エネルギーを100°C以上の温度領域の熱源として利用する場合、真空断熱式の集熱器が一般の平板型集熱器と比較して有利となる。しかしながら、通常、真空式集熱器は集熱板(受熱部)をガラス管に封入した集熱管を多数平行に並べる構造となっているため、平板型集熱器と比べ、太陽光の入射方向に対して集熱効率が複雑な変化を示し、太陽光の入射方向を集熱器に対する天頂角と方位角のような2個のパラメータを用いて記述しなければならない¹⁾。また、通常の選択吸収面集熱板はその裏面にも表面と同様の選択吸収性を持つ膜が形成されており、集熱器の後方から入射して来る光も吸収さ

れるので、集熱器の有効透過吸収係数が見掛け上増加したように観測される²⁾。この見掛け上の増加の大きさは、集熱器の背後にある反射板等の物体が持つ太陽光に対する反射特性によって、大きく異なる。このような多くのパラメータに対して、集熱効率を詳細に測定することは困難である。このため、真空式集熱器を用いた集熱システムの性能を予測するために理論計算による集熱効率特性の評価が必要となると思われる。

本報告では、平らな集熱板を持つ真空ガラス管型集

* 名古屋工業技術試験所, 第5部第3課
Solar Research Laboratory, Government
Industrial Research Institute, Nagoya.

** 名古屋工業技術試験所, 第5部第3課 課長
Solar Research Laboratory, Government
Industrial Research Institute, Nagoya. Chief

*** 名古屋大学工学部化学工学科 教授
Department of Chemical Engineering, Faculty
of Engineering, Nagoya University, Professor

熱器に集熱効率を向上させるためのブースタとして乱反射板又は鏡面反射板を取付けた場合、集熱器において熱に変換される太陽光の割合を表わす集熱器の有効透過吸収係数 $(\tau\alpha)_e^{3)}$ を求める式を理論的に導き、計算により入射角に対する依存性などのいくつかの要素の影響について検討した結果を述べる。

2. 集熱器の座標系とモデルの設定

2.1 集熱器及び座標系

理論計算のモデルとして用いる集熱器の形状を図1に示し、その主な仕様を表1に示す。また、集熱板表面の太陽吸収率の入射角依存性のモデルとして使用するアルマイト系選択吸収面の吸収率を図2に示す。

太陽光の入射方向及び集熱器上の位置を記述するため、図3に示すように、 X 軸を集熱板上でガラス管の軸に垂直な方向、 Y 軸を集熱管の中心線、 Z 軸を集熱板に垂直な方向に定め、入射光と Z 軸のなす角を θ 、入射光の $X-Y$ 面への射影と X 軸のなす角を φ とする。また、ガラス管上の任意の位置を表わす角を θ_r と

表1 モデルとする真空ガラス管型集熱器の仕様

ガラスの屈折率	$n_g=1.52$
ガラスの吸収係数	$\alpha_g=12 \text{ m}^{-1}$
ガラス管の半径	$r_g=0.04 \text{ m}$
ガラス管の肉厚	$t_g=0.002 \text{ m}$
集熱板の幅	$W_p=0.07 \text{ m}$
ガラス管の中心間距離	$S=0.1 \text{ m}$
集熱板と反射板との間隔	$H=0.09 \text{ m}$
集熱板裏面の吸収率	$\alpha_b=0.7$
反射板の反射率	$\rho_b=0.8$

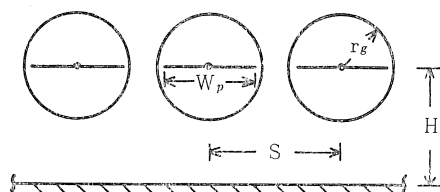


図1 モデルとする真空ガラス管型集熱器の概略

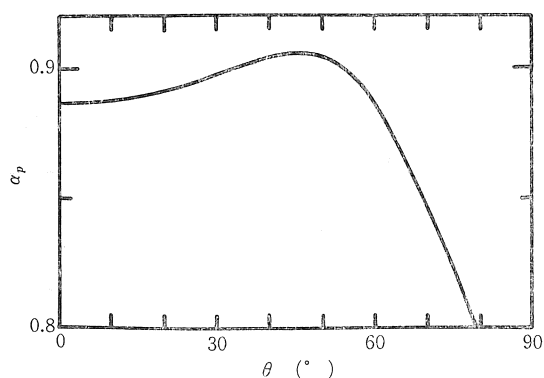


図2 集熱板の表面の太陽吸収率の入射角依存性のモデル

する。角 θ の $X-Z$ 面への射影 θ' は式(1)で与えられ、入射角 (θ, φ) の光のガラス管上 θ_r の位置における入射角 θ_i は式(2)で計算される。

$$\theta' = -\tan^{-1}(\sin \theta \cos \varphi / \cos \theta) \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta_i = \cos^{-1}(-\sin \theta \cos \varphi \sin \theta_r + \cos \theta \cos \theta_r) \dots\dots\dots (2)$$

以下の計算においては、簡単のため、集熱器の端部の影響を無視し、集熱板の面積を集熱面積とする。^{脚注}

2.2 集熱器有効透過吸収係数

真空ガラス管型集熱器の集熱板に吸収される太陽光は、主に次の3つの径路を通る^{2), 4), 5)}。

- 1) 天空から直接ガラス管を透過して集熱板に到達する径路。
- 2) 隣合う集熱板の間を通過し、後方の反射板により反射され集熱板の裏面に到達する径路。
- 3) 隣接するガラス管の表面で反射された光が集熱板に到達する径路。

上記の径路を通る光の $(\tau\alpha)_e$ に対する寄与を、 $(\tau\alpha)_d$ 、 $(\tau\alpha)_b$ 、 $(\tau\alpha)_i$ で表わし、それぞれ理論計算する。

3. $(\tau\alpha)_d$ の理論計算

有限な厚さを持つガラス管に光が入射した場合、図4に示すように、ガラス管を透過する前と透過後では光の進行方向が変化する。ガラス管上の θ_r の位置に角 (θ, φ) で入射し、ガラス管内に透過した光が X 軸と交わる位置を X_p で表わした場合、 X_p は r_g 、 t_g 、 n_g 、 (θ, φ) 、 θ_r の関数として計算される⁶⁾。

脚注 集熱器に関する熱の授受の主要な部分は集熱器の光熱変換部を通じて行われ、理論解析を行う場合この部分の表面積を集熱面積として取扱うのが最も便利である。光熱変換部が平板であり特別な集光システムが取付けられていない場合、光熱変換部の全表面積を用いるより平板の面積を用いる方がより直感的である。

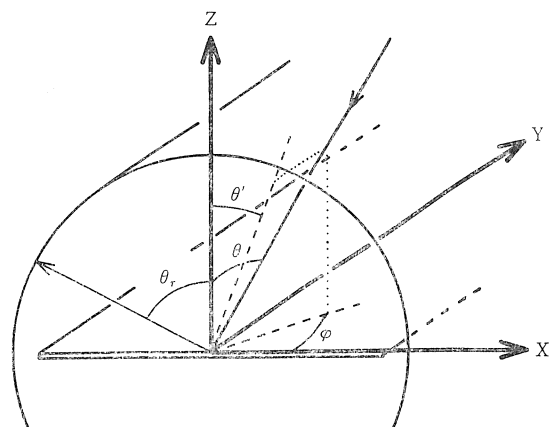


図3 集熱器上の位置及び光の入射方向を記述するための座標系

$$X_p = (r_g - t_g)(\sin \theta_{r2} - \cos \theta_{r2} x_2 / z_2) \dots (3)$$

入射角 (θ, φ) の光に対するガラス管の透過率 $\tau(\theta, \varphi)$ を、ガラス管を透過して実際に集熱板に到達する光の量とガラス管を取去った場合集熱板に到達する光の量の比で定義した時、 $\tau(\theta, \varphi)$ は式(4)により計算される。

$$\tau(\theta, \varphi) = \frac{r_g \int_{|X_p| \leq W_p/2} \tau_g(\theta_i) \cos(\theta_r - \theta') d\theta_r}{W_p \cos \theta'} \dots (4)$$

但し、 $\theta' > \cos^{-1}(r_g/(S - W_p/2))$ を満たす場合、隣のガラス管を透過した光が集熱板に入射するので、隣のガラス管を透過した光が入射する θ_r の範囲で式(4)の被積分関数を式(5)で置換える。

$$\tau_g(\theta_i) \tau_g^2(\theta_{i,n}) \cos(\theta_r - \theta') \dots (5)$$

なお、簡単のため隣接するガラス管を透過した光の進行方向の変化を無視する。

$(\tau\alpha)_d$ は式(6)により計算され、その入射角依存性を図5に示す。

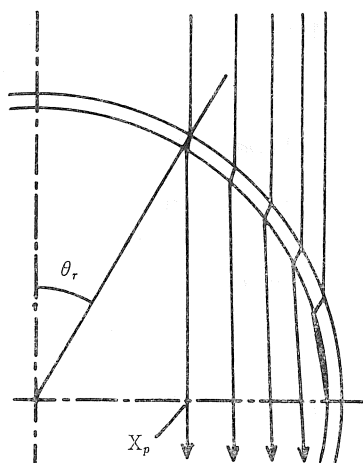


図4 ガラス管を透過する光の進路変化
($r_g=0.04\text{m}$, $t_g=0.002\text{m}$, $n_g=1.52$)

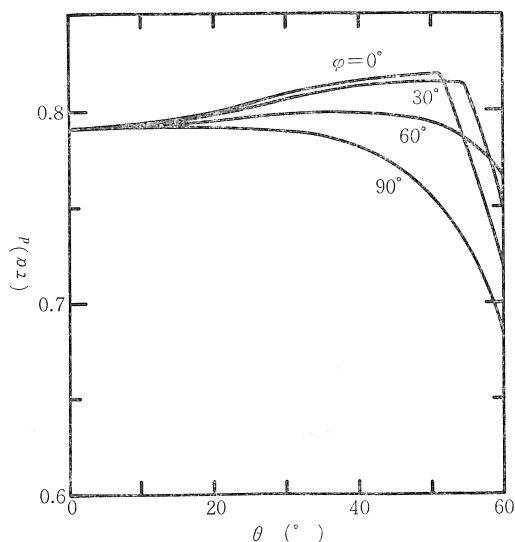


図5 $(\tau\alpha)_d$ の入射角依存性

$$(\tau\alpha)_d = \tau(\theta, \varphi) \alpha_p(\theta) / \{1 - \rho_g(1 - \alpha_p)\} \dots (6)$$

入射角が $Y-Z$ 面内で変化する場合($\varphi=90^\circ$)、 $(\tau\alpha)_d$ は θ の増加に従って単調に減少し、通常の平板型集熱器の有効透過吸収係数と同様な変化を示す。また、入射角が $X-Z$ 面内で変化する場合($\varphi=0^\circ$)、 $(\tau\alpha)_d$ は、 θ の増加に従って序々に増加し、入射光の θ' が隣のガラス管を透過するようになる $\theta' \simeq \cos^{-1}(r_g/(S - W_p/2))$ を越えると急激に減少する。このように、 $(\tau\alpha)_d$ は入射方位 φ に大きく依存する。

4. $(\tau\alpha)_b$ の理論計算

通常、 $(\tau\alpha)_b < (\tau\alpha)_d$ であるので、簡単のためここでは、光がガラス管を透過する時に起きる屈折による光の進行方向の変化を無視する。

ある集熱管の中心を原点とし、そのガラス管に接する光が X 軸と交わる点を X_1 とし、その右隣のガラス管に接する光が X 軸と交わる点を X_2 とする。また、 $W_p/2 < X < X_1$ を通る光及び $X_2 < X < S - W_p/2$ を通る光のそれぞれのガラス管に対する入射角を $\theta_{i,1}$ 及び $\theta_{i,2}$ とする。なお、 $X_1 > X_2$ ($\theta' > \cos^{-1}(2r_g/S)$)の場合は $X_2 < X < X_1$ を通過する光が2本のガラス管を透過することになる。

$$X_1 = r_g / \cos \theta' \dots (7)$$

$$X_2 = S - r_g / \cos \theta' \dots (8)$$

$$\theta_{i,1} = \cos^{-1}(-\sin \theta \cos \varphi \sin \theta_{r,1} + \cos \theta \cos \theta_{r,1}) \dots (9)$$

$$\theta_{r,2} = \cos^{-1}(-\sin \theta \cos \varphi \sin \theta_{r,2} + \cos \theta \cos \theta_{r,2}) \dots (10)$$

$$\theta_{r,1} = -\sin^{-1}[\{X \cos^2 \theta' + \sin \theta' \sqrt{r_g^2 - X^2 \cos^2 \theta'}\} / r_g] \dots (11)$$

$$\theta_{r,2} = -\sin^{-1}[\{(X - S) \cos^2 \theta' + \sin \theta' \sqrt{r_g^2 - (X - S)^2 \cos^2 \theta'}\} / r_g] \dots (12)$$

ガラス管上の位置 θ_r で反射された光は $|2\theta_r - \theta'| > \pi/2$ を満たす場合、 $X = X_H$ において反射板に入射し、

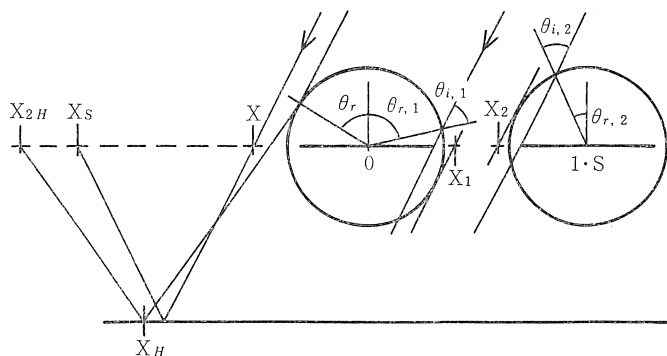


図6 集熱板の間を通過する光の進路

この光が鏡面反射された場合 $X=X_{2H}$ において X 軸と交わる。

$$X_H = -r_g \sin \theta_r + (H + r_g \cos \theta_r) \tan(2\theta_r - \theta') \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$X_{2H} = -r_g \sin \theta_r + (2H + r_g \cos \theta_r) \tan(2\theta_r - \theta') \quad \dots\dots\dots(14)$$

また、 X を通過した光が鏡面反射された場合、 $X=X_S$ において再び X 軸と交わる。

$$X_S = X + 2H \tan \theta' \quad \dots\dots\dots(15)$$

4. 1 乱反射板を取付けた場合

隣合う集熱板の間を通過した光により照らされる反射板は図7に示すような4つの部分に分けることができる。反射板の部分1及び3に入射する光の量をそれぞれ I_1 及び I_3 とし、部分2に入射する光の量を I_2 とし、さらに部分4に入射するガラス管によって反射された光の量を I_4 とする。入射太陽光の光線に垂直な面上での強さを I_b とした場合、これらの量はそれぞれ次式により与えられる。

$$I_1 = I_3 = I_b \cos \theta' \int_{W_p/2}^{X_1} \tau_g(\theta_{i,1})^2 dX \quad (X_1 < X_2),$$

$$\text{又は } I_b \cos \theta' \int_{W_p/2}^{X_2} \tau_g(\theta_{i,1})^2 dX \quad (X_1 > X_2) \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$I_2 = I_b \cos \theta' (X_2 - X_1) \quad (X_1 < X_2), \text{ 又は}$$

$$I_b \cos \theta' \int_{X_2}^{X_1} \tau_g(\theta_{i,1})^2 \tau_g(\theta_{i,2})^2 dX \quad (X_1 > X_2) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$I_4 = I_b r_g \{ \int \rho_g(\theta_i) \cos(\theta_r - \theta') d\theta_r + \int \rho_g(\theta_i) \cos(\theta_r - \theta') d\theta_r \} \quad \dots\dots\dots(18)$$

但し、式(18)の θ_r に関する積分は X_H が部分4に存在する範囲とし、部分4以外の場合に入射するガラス管からの反射光は微量として無視する。また、集熱板の間隙の左側と右側のガラス管からの反射光を考慮しているため式に2つの積分を書いている。 $(\tau\alpha)_b$ の値は式(19)を用いて計算され、式中の i は集熱板、 j は反射板の部分を表す。

$$(\tau\alpha)_b = \tau_a \rho_b \alpha_b \sum_i \sum_j F_{i,j} I_j / I_b W_p \cos \theta' \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここで、反射板が拡散面であるので、ガラス管の透過率として式(4)を θ と φ について積分平均した拡散光に対するガラス管の透過率 τ_a 、及び反射板の部分 j から i 番目の集熱板の裏面への形態係数 $F_{i,j}$ を用いた。

太陽光に照らされた反射板の部分から第3近傍集熱板までを考慮して計算した $(\tau\alpha)_b$ の入射角依存性及びガラス管の中心間距離 S に対する依存性をそれぞれ図8及び図9に示す。入射角が $\varphi=90^\circ$ のもとで変化し

た場合、 $(\tau\alpha)_b$ に最も大きい寄与をする I_2 が変化せず、 $(\tau\alpha)_b$ の変化は僅かである。しかし、 $\varphi=0^\circ$ のもとで θ が変化した場合、ガラス管を透過する光の割合が変化し、光により照らされる反射板上の部分が移動

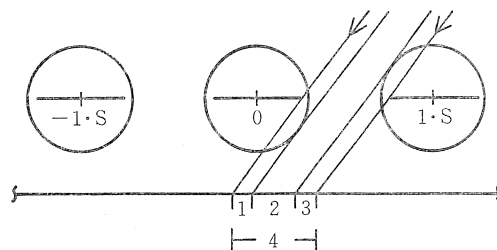


図7 集熱板の間を通過する光によって照らされる乱反射板の区分

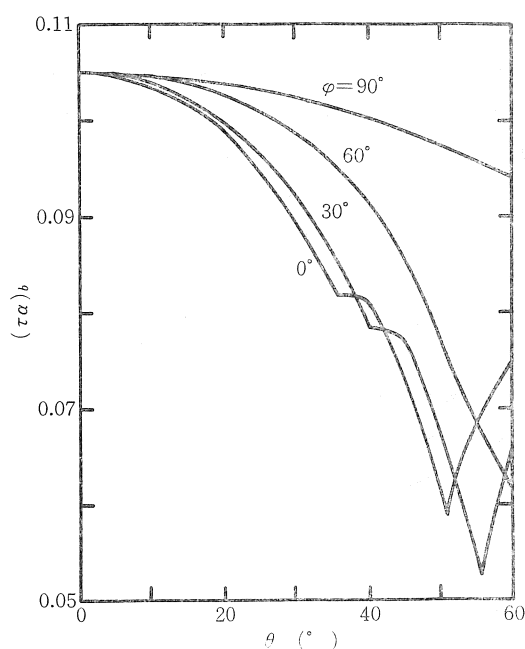


図8 乱反射板に対する $(\tau\alpha)_b$ の入射角依存性 ($S=0.1\text{ m}$)

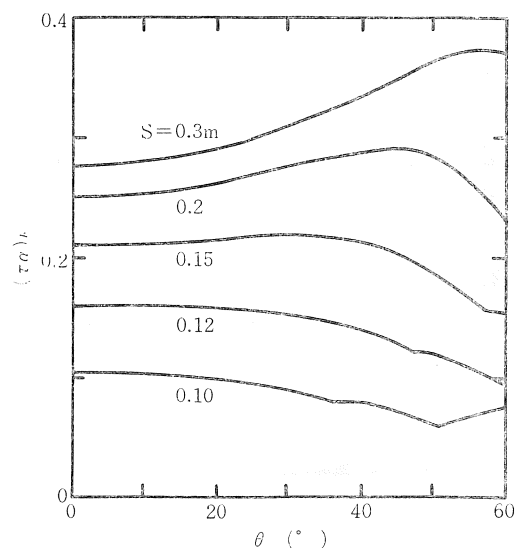


図9 ガラス管の中心間の距離 S を変化した場合の乱反射板に対する $(\tau\alpha)_b$ の変化 ($\varphi=0^\circ$)

することなどにより, $(\tau\alpha)_b$ がかなり変化する。

4. 2 鏡面反射板を取付けた場合

X軸をXにおいて通過し, 鏡面反射され式(15)により与えられる $X=X_S$ において再びX軸と交わる光が, $|X_S-nS| < W_p/2$ を満す場合, この光は, ガラス管の θ_r, s_1 の位置に入射角 θ_{i, s_1} で入射し, 集熱板の裏面に達する。

$$\theta_r, s_1 = \pi + \sin^{-1} \left[\{ (X_S - nS) \cos^2 \theta' \pm \sin \theta' \times \sqrt{r_g^2 - (X_S - nS)^2 \cos^2 \theta'} \} / r_g \right] \dots (20)$$

複号の+は $\theta' < 0$, -は $\theta' > 0$ の場合

$$\theta_{i, s_1} = \cos^{-1} (\sin \theta \cos \varphi \sin \theta_r, s_1 + \cos \theta \cos \theta_r, s_1) \dots (21)$$

ガラス管により反射されさらに反射板により反射された光がX軸と交わる点 X_{2H} が, $|X_{2H}-nS| < W_p/2$ を満す場合, この光はガラス管の θ_r, s_2 の位置に θ_{i, s_2} で入射し集熱板に達する。

$$\theta_r, s_2 = \pi + \sin^{-1} \left[\{ (X_{2H} - nS) \cos^2 (2\theta_r - \theta') \pm \sin (2\theta_r - \theta') \times \sqrt{r_g^2 - (X_{2H} - nS)^2 \cos^2 (2\theta_r - \theta')} \} / r_g \right] \dots (22)$$

複号の+は $n \leq 0$, -は $n > 0$ の場合

$$\theta_{i, s_2} = \cos^{-1} \left[\sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi} \times \{ \sin \theta_r, s_2 \sin (2\theta_r - \theta') + \cos \theta_r, s_2 \cos (2\theta_r - \theta') \} \right] \dots (23)$$

$(\tau\alpha)_b$ は次式で計算される。

$$(\tau\alpha)_b = \rho_b \alpha_b \left\{ \int_{|X_S| \leq W_p/2} F(X) \tau_g(\theta_{i, s_1}) dX / W_p + r_g \int_{|X_{2H}-nS| \leq W_p/2} \rho_g(\theta_i) \tau_g(\theta_{i, s_2}) \times \cos(\theta_r - \theta') d\theta_r / W_p \cos \theta' \right\} \dots (24)$$

ここで, $F(X) = \tau_g(\theta_{i, 1})^2$ ($W_p/2 < X < X_1$),
 $\tau_g(\theta_{i, 2})^2$ ($X_2 < X < S - W_p/2$),
 1 ($X_1 < X < X_2$), 又は,
 $\tau_g(\theta_{i, 1})^2 \tau_g(\theta_{i, 2})^2$ ($X_2 < X < X_1$)

鏡面反射板による $(\tau\alpha)_b$ の入射角依存性の計算結果を図10に示し, S を変化させた場合の $(\tau\alpha)_b$ の変化を図11に示す。この $(\tau\alpha)_b$ の入射角依存性は非常に複雑で急激な変化を示すが, 集熱板の間を通り反射板に達した光が反射されて再び集熱板の間を通抜ける時, $(\tau\alpha)_b$ が極小となる $2H \tan \theta' / S$ の周期的な関数となる。

5. $(\tau\alpha)_t$ の理論計算

通常, $(\tau\alpha)_d > (\tau\alpha)_t$ であるので, ここでも簡単のため, 光がガラス管を透過する時に起きる屈折による光の進行方向の変化を無視する。

ガラス管により反射された光は, 図12で示すように進み, $X=X_t$ においてX軸と交わり, $|X_t-nS| \leq W_p/2$ を満す時, 集熱板に入射することになる。

$$X_t = -r_g (\sin \theta_r - \tan (2\theta_r - \theta') \cos \theta_r) \dots (25)$$

$$|2\theta_r - \theta'| > \pi/2$$

このようにガラス管上の位置 θ_r で反射された光は, n 個隣のガラス管上の位置 θ_r, tn に入射角 $\theta_{i, tn}$ で入射する。

$$\theta_r, tn = -\sin^{-1} \left[\{ (X_t - nS) \cos^2 (2\theta_r - \theta') \pm \sin (2\theta_r - \theta') \times \sqrt{r_g^2 - (X_t - nS)^2 \cos^2 (2\theta_r - \theta')} \} / r_g \right] \dots (26)$$

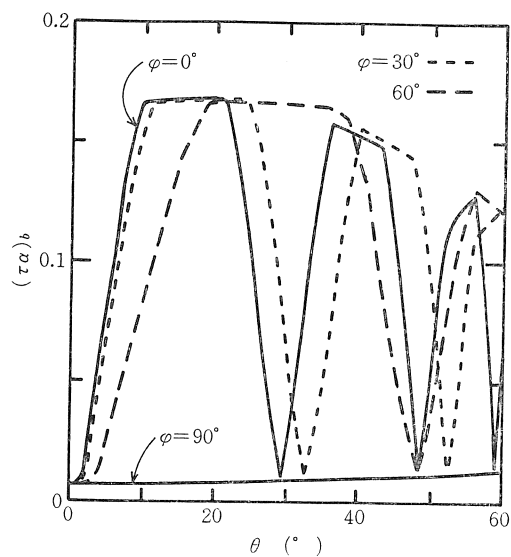


図10 鏡面反射板に対する $(\tau\alpha)_b$ の入射角依存性 ($S=0.1$ m)

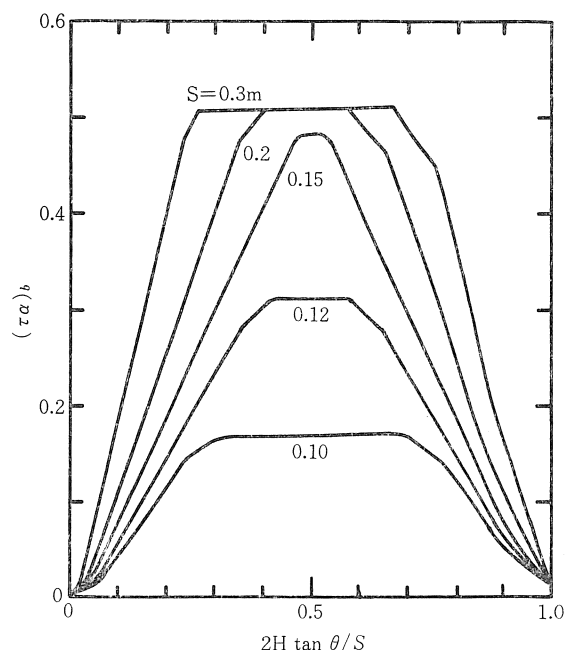


図11 ガラス管の中心間の距離 S を変化させた場合の鏡面反射板に対する $(\tau\alpha)_b$ の変化 ($\varphi=0^\circ$)

複号は $X_i \leq 0$ に対応

$$\theta_{i,t_n} = \cos^{-1} \{ \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi} \{ \sin(2\theta_r - \theta') \\ \times \sin \theta_{r,t_n} + \cos(2\theta_r - \theta') \cos \theta_{r,t_n} \} \dots (27)$$

第2隣接集熱管に吸収される反射光まで考慮した $(\tau\alpha)_i$ は、式(28)で計算される。

$$(\tau\alpha)_i = r_g \left\{ \int_{|X_i \pm S| \leq W_p/2} \rho_g(\theta_i) \tau_g(\theta_{i,t_1}) \right. \\ \times \alpha_p \cos(\theta_r - \theta') d\theta_r + \int_{|X_i \pm 2S| \leq W_p/2} \\ \rho_g(\theta_i) \tau_g(\theta_{i,t_1})^2 \tau_g(\theta_{i,t_2}) \alpha_p \\ \times \cos(\theta_r - \theta') d\theta_r \left. \right\} / W_p \cos \theta' \dots (28)$$

但し、原点を含むガラス管に入射して来る天空からの光の一部が隣のガラス管を透過して来る場合には、式(5)で行ったものと同様の扱いをしなければならない。

$(\tau\alpha)_i$ の入射角依存性の計算結果を図13に示す。計算された $(\tau\alpha)_i$ の値は0.01~0.03であり、 $(\tau\alpha)_d$ 及び $(\tau\alpha)_b$ と比べた場合微量である。また、距離 S を増加させた時、 $(\tau\alpha)_i$ は近似的に S に逆比例して減少する。

6. 考 察

$(\tau\alpha)_e$ の値は、前述の $(\tau\alpha)_d$ 、 $(\tau\alpha)_b$ 及び $(\tau\alpha)_i$ とガラス管自身が太陽光を吸収することによる補正項

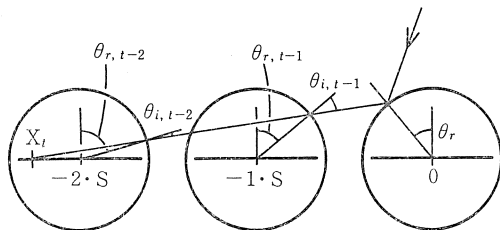


図12 ガラス管の表面で反射され隣接する集熱板に入射する光の進路

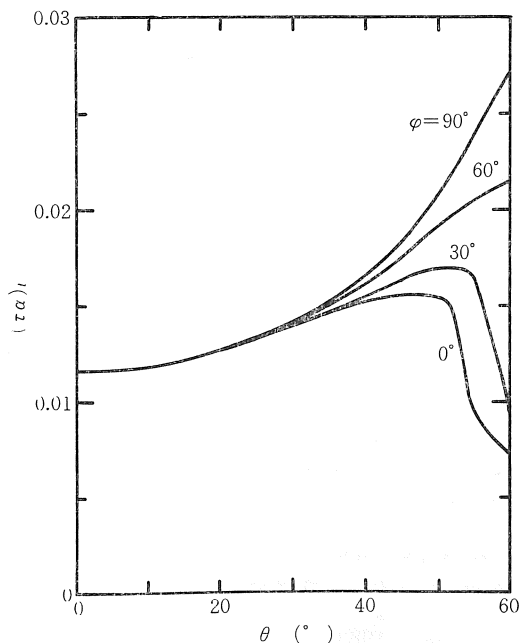


図13 $(\tau\alpha)_i$ の入射角依存性 ($S=0.1$ m)

$(\tau\alpha)_g$ の和として計算される。 $(\tau\alpha)_g$ の値は、ガラスの吸収率 $\alpha_g \approx 0.03$ 、ガラス管に入射する全太陽エネルギーの強さ I_t と入射太陽光の光線に垂直な面上での強さ I_b の比 (I_t/I_b) 、 $(I_t$ は、近似的に I_b と反射板からガラス管に入射する光の強さの和として与えられ、その強さは $I_b(1+\rho_b)$ より小さい.)、集熱板からガラス管への熱伝達係数とガラス管から外界への熱伝達係数との比 $(U_p/U_2) \leq 0.05$ を用いた式(29)で計算されるが、微量量として無視することができる。

$$(\tau\alpha)_g = \alpha_g (I_t/I_b) (2r_g/W_p) (U_p/U_2) \dots (29)$$

よって、 $(\tau\alpha)_e$ の値は次式により与えられる。

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha)_d + (\tau\alpha)_b + (\tau\alpha)_i \dots (30)$$

理論計算された3つの係数の大きさは、 $(\tau\alpha)_d > (\tau\alpha)_b > (\tau\alpha)_i$ の順となる。 $(\tau\alpha)_e$ に最大の寄与をする $(\tau\alpha)_d$ の値は、集熱器の形状を主に決定する S の大きさを変化させても、隣のガラス管を透過した光が集熱板に入射するようになり式(5)を適用しなければならない θ' の領域が変化するのみで、他の主要な部分は全く変化しない。一方、 $(\tau\alpha)_b$ の値は S に大きく依存し、その最大値は、 S の増加に従って単調に増加し、乱反射板を取付けた集熱器の場合 $\alpha_b \rho_b \tau_d$ に漸近し、鏡面反射板を取付けた集熱器の場合 $\alpha_b \rho_b \tau(\theta, \varphi)$ で飽和する。また、 $(\tau\alpha)_i$ の値は S の増加に従って減少するが、その値はかなり小さい。このため、集熱器の $(\tau\alpha)_e$ の S に対する依存性はほぼ $(\tau\alpha)_b$ により決定される。乱反射板を取付けた集熱器に対して、 S を変化させた場合の $(\tau\alpha)_e$ の変化を図14に示す。集熱器の集熱効率を向上させる観点から $(\tau\alpha)_e$ を増大させるために S を増加させることが考えられるが、 S を増すことは、各集熱管を連結するヘッダー部を長くしこの

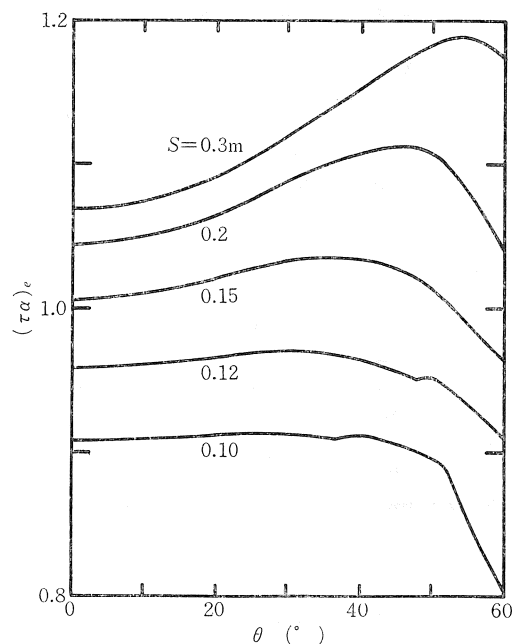


図14 乱反射板を取付けた集熱器に対してガラス管の中心間の距離 S を変化させた場合の $(\tau\alpha)_e$ の変化 ($\varphi=0^\circ$)

部分からの熱損失を増加させ、しかも集熱器の占有面積を増加させるため、必ずしも得策ではないと思われる。

乱反射板を取付けた場合の $(\tau\alpha)_b$ の入射角による変化は比較的穏やかであり、 $S < 0.15 \text{ m}$ の場合 $(\tau\alpha)_b$ は $\theta = 0^\circ$ において最大値を持つ。他方、鏡面反射板を取付けた場合の $(\tau\alpha)_b$ は、急激な変動を示し、近似的に角 θ' の関数となっており、その最大値を $\theta' \approx 0$ において与える。この集熱器のY軸を地上で東西方向に向けて設置した場合、角 θ' はほぼ太陽高度に対応する。このため、鏡面反射板を取付け S の大きさを調節した集熱器を使用することにより、太陽熱利用システムに対する熱負荷の季節変動を、太陽高度の季節変化を利用して補うことが可能となると思われる。

7. 結 言

真空ガラス管型集熱器の $(\tau\alpha)_e$ を構成する3つの主要な項 $(\tau\alpha)_d$ 、 $(\tau\alpha)_b$ 及び $(\tau\alpha)_t$ を理論計算した結果、実測することが困難であった $(\tau\alpha)_e$ の入射角依存性を明らかにすることができた。また、集熱管の背後に取付ける反射板の種類及び集熱器の形状(S の大きさ)により $(\tau\alpha)_b$ が大きく異なることが示された。

記 号

a_g	: ガラスの吸収係数 $[\text{m}^{-1}]$
$F_{i,j}$	: 乱反射板の部分 j から集熱板 i の裏面への形態係数
H	: 集熱板と反射板との間隔 $[\text{m}]$
I_b	: 入射太陽光線の法線面強度 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
I_i	: 乱反射板の部分 i ($= 1 \cdots 4$)に入射する光の強度
I_t	: ガラス管の表面に入射する全太陽光の強度 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
n_g	: ガラスの屈折率
r_g	: ガラス管の半径 $[\text{m}]$
S	: 集熱管の中心間距離 $[\text{m}]$
t_g	: ガラス管の肉厚 $[\text{m}]$
U_p	: 集熱板からガラス管への熱伝達係数 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
U_2	: ガラス管から外界への熱伝達係数 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
W_p	: 集熱板の幅 $[\text{m}]$
X_H	: ガラス管に反射された光の反射板上への入射位置 $[\text{m}]$
X_{2H}	: ガラス管で反射され、鏡面板で反射された光のX軸切片値 $[\text{m}]$
X_p	: ガラス管の位置 θ_r に入射しガラス管を透過した光のX軸切片値 $[\text{m}]$
X_s	: X軸上のXを通過し鏡面板で反射された光のX軸切片値 $[\text{m}]$
X_t	: ガラス管で反射された光のX軸切片値 $[\text{m}]$
X_1, X_2	: 原点を含むガラス管。右隣りのガラス管に接する光のX軸切片値 $[\text{m}]$
x_2, z_2	: ガラス管を透過した光の進行方向のX, Z成分(参考文献6))
α_b, α_p	: 集熱板の裏面, 表面の太陽吸収率
α_g	: ガラスの吸収率
θ	: 入射光の集熱器に対する天頂角 $[\circ]$
θ_i	: 光のガラス管面における入射角 $[\circ]$
$\theta_{i,n}$	: 隣のガラス管表面における入射角 $[\circ]$

$\theta_{i,1}, \theta_{i,2}$	: X軸上の $W_p/2 < X < X_1$, $X_2 < X < S - W_p/2$ を通過する光のガラス管面への入射角 $[\circ]$
θ_{iS1}	: 鏡面板により反射された光のガラス管下面への入射角 $[\circ]$
$\theta_{i,S2}$	: ガラス管表面で反射され、鏡面板により反射された光のガラス管下面への入射角 $[\circ]$
$\theta_{i,tn}$	: ガラス管表面で反射された光の n 隣りのガラス管表面への入射角 $[\circ]$
θ_r	: ガラス管上の位置を表すための角 $[\circ]$
θ_{r2}	: ガラス管を透過する光のガラス管内面への入射位置(参考文献6)) $[\circ]$
$\theta_{r,1}, \theta_{r,2}$	: X軸上の $W_p/2 < X < X_1$, $X_2 < X < S - W_p/2$ を通過する光のガラス管への入射位置 $[\circ]$
$\theta_{r,S1}$	: 鏡面板により反射された光のガラス管下面への入射位置 $[\circ]$
$\theta_{r,S2}$	: ガラス管表面で反射され、鏡面板により反射された光のガラス管下面への入射位置 $[\circ]$
$\theta_{r,tn}$	: ガラス管表面で反射された光の n 隣りのガラス管における入射位置 $[\circ]$
θ'	: 天頂角 θ のガラス管に垂直な面への射影角 $[\circ]$
ρ_b, ρ_g	: 反射板, ガラスの反射率
τ	: ガラス管の透過率
τ_d	: 拡散光に対するガラス管の透過率 0.846
τ_g	: ガラスの透過率
$(\tau\alpha)_e$	: 集熱器有効透過吸収係数
$(\tau\alpha)_d, (\tau\alpha)_b, (\tau\alpha)_t$	: 天空から直接ガラス管を透過し集熱板の表面に達する光, 隣合う集熱板の間を通過し反射板に反射され集熱板の裏面に達する光, 隣接するガラス管の表面で反射され集熱板の表面に達する光を吸収することによる $(\tau\alpha)_e$ への寄与
$(\tau\alpha)_g$	: ガラス管が吸収する光の $(\tau\alpha)_e$ への寄与
φ	: 入射光の集熱器に対する方位角 $[\circ]$
(注 角 θ は時計方向, 角 θ_r 及び θ' は反時計方向にZ軸から測ることとする)	

参 考 文 献

- 1) J. D. Felske, "Analysis of an evacuated cylindrical solar collector", Solar Energy, Vol.22, 567 (1979)
- 2) 山東ら, 「真空断熱円筒形集熱器の集熱特性」, 空気調和衛生工学会論文集, No.18, 63 (1982)
- 3) J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes", Ch.6 & 7, John Wiley & Sons, New York (1974)
- 4) F. Kreith and J. F. Kreider, "Principles of solar Engineering", Ch.7, McGraw Hill, New York (1978)
- 5) S. P. Chow, et al., "Effect of collector components on the collection efficiency of tubular evacuated collectors with diffuse reflectors", Solar Energy, Vol.32, 251 (1984)
- 6) M. Sando, et al., "Theoretical analysis of incident angle dependency of $(\tau\alpha)_e$ value for an evacuated tubular collector", Proceedings of 8th Biennial Congress of ISES, Australia, Perth, Vol.2, 983 (1983)

(昭和59年7月11日 原稿受理)