

管型集熱器の入射角補正因子の記述法に関する考察

A Method to Describe the Incident Angle Modifier of Cylindrical Collector.

山 東 睦 夫*	藤 井 篤*
Mutsuo SANDO	Atsushi FUJII
種 村 栄**	野 口 哲 男***
Sakae TANEMURA	Tetsuo NOGUCHI
外 山 茂 樹****	
Sigeiki TOYAMA	

Abstract

Two parameters should be used to define the direction of incident radiation onto cylindrical collector. The following coordinate system is introduced. The normal to collector is Z axis, and the direction perpendicular to Z axis on the plane which is perpendicular to the cylinder is X axis. The angle between Z axis and the projection of incident beam onto X-Z plane is θ_1 , and the angle between the projection and incident beam is θ_2 . The incident angle modifier can be described by the formula of $f(\theta_1)\{1-b(1/\cos\theta_2-1)\}$. The incident angle modifiers are calculated for five types of cylindrical collectors. The formula of incident angle modifier is valid under the condition of usual collector operation.

Key Words : Description, Incident Angle Modifier, Cylindrical Collector, Theoretical Calculation, Transmission-absorptance Factor.

1. 緒 言

集熱器の集熱効率特性は、一般に、太陽光が集熱器にほぼ垂直に入射する条件のもとで測定され^{(1)~(3)}、集熱効率 η は次式により表わされる⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} \eta &= F'(\tau\alpha)_e - (F'U_L/U_0)\{U_0(T_m-T_a)/I\} \\ &= \eta_0 - aT^* \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 F' は集熱器効率係数、 $(\tau\alpha)_e$ は有効透過吸収係数、 U_L は集熱器全熱損失係数、 U_0 は無次元化定数、 T_m 及び T_a は集熱器内熱媒体の平均温度及び外気温、また I は入射太陽エネルギー強度を表わす。式 (1) で表わされる集熱効率特性を用いて、太陽熱利用システムにおける長期の集熱量を予想するためには、太陽光の入射方向による集熱効率の変化を考慮する必要がある。集熱効率特性の入射角の変化に対する補正是、 η_0 値又は $(\tau\alpha)_e$ に入射角補正因子を掛けることにより行われる。平板型集熱器に対する入射角補正因子は、入射角 θ の関数である $(1/\cos\theta-1)$ の多項式により近似することができる⁽²⁾。しかしながら、管状の集熱器に対する光の入射方向を定義するために、例えば天頂角と方位角のような 2 つの独立なパラ

メータが必要である^{(5),(6)}。また、入射角補正因子を求める場合には集熱効率を測定しなければならないため、測定項目はできるだけ少なくする必要がある。ここでは、入射角補正因子が光の入射方向を記述する 2 つのパラメータによってそれぞれ独立に表わされる関数の積となるようなパラメータ^{(7),(8)} を導入しその有効性を検証する。

* 名古屋工業技術試験所 セラミックス基礎部 材料評価課 主任研究官

Division of Material Evaluation, Department of Ceramic Science, Government Industrial Research Institute, Nagoya, Senior Research Scientist

** 名古屋工業技術試験所 セラミックス基礎部 材料評価課 課長

Division of Material Evaluation, Department of Ceramic Science, Government Industrial Research Institute, Nagoya, Manager

*** (財)機械電子検査検定協会 技術顧問

Japan Machinery and Metals Inspection Institute, Technical Advisor

**** 名古屋大学 工学部 化学工学教室 教授

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University, Professor

2. 管型集熱器に対する入射方向を記述するためのパラメータ

図1に示すように、Y軸をガラス管の軸方向、Z軸を太陽集熱器に垂直な方向として、X軸をY-Z面に垂直な方向に定義する。ここで、入射光線*i*のX-Z面への射影*p*とZ軸のなす角 θ_1 及び入射光線*i*とその射影*p*のなす角 θ_2 を導入する。角 θ_1 と θ_2 の数学的な極座標系における天頂角 θ と方位角 ϕ の関係は、それぞれ次の式で表わされる⁽⁷⁾。

$$\theta_1 = \sin^{-1}(\sin \theta \cos \phi / (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \phi)^{1/2}) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(\sin \theta \sin \phi) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

角 θ_1 を固定し、角 θ_2 のみを変化させた場合、集熱板に吸収される太陽光線の割合は、ガラスにおける透過率や集熱板における吸収率の変化の影響のみを受ける。また角 $\theta_2=0$ の条件のもとに角 θ_1 を変化させた場合、入射光線が集熱板に吸収されるまでに通過する経路が主に変化する。このため、入射角補正因子が角 θ_1 の関数 $f(\theta_1)$ 及び角 θ_2 の関数 $g(\theta_2)$ の積で表わされると仮定した場合には、管型集熱器の入射角補正因子は次式により表わされる。

$$(\tau\alpha)_e(\theta_1, \theta_2) / (\tau\alpha)_e(\theta_1=0, \theta_2=0) \\ = f(\theta_1)g(\theta_2) \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、

$$g(\theta_2) = 1 - bs \text{ 又は } 1 - b_1 s - b_2 s^2 \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$s = 1/\cos \theta_2 - 1 \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

関数 $g(\theta_2)$ の多項式の係数 b 、 b_1 及び b_2 は厳密に

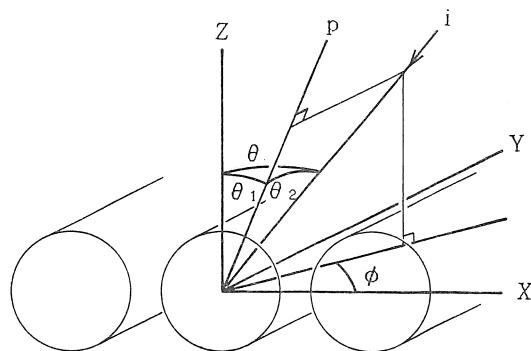


図1 管型集熱器に入射する光の方向を記述するための θ_1 と θ_2

述べると角 θ_1 の関数である。これらの係数が一定と考えることのできる角 θ_1 の範囲が、ここで導入した角 θ_1 と θ_2 を含む式(4)により管型集熱器の入射角補正因子を記述する方法の適用範囲である。

3. 管型集熱器の入射角補正因子に関する計算モデル

管型集熱器の入射角補正因子の理論値は、ある入射角(θ_1 , θ_2)に対して計算される有効透過吸収係数 $(\tau\alpha)_e$ と、垂直入射する場合($\theta_1=0, \theta_2=0$)に計算される $(\tau\alpha)_e$ の比により求められる。理論計算に使用する5つのタイプの集熱器のガラス管に垂直な面における形状を図2に示し、それらの特徴を表1に示す。ここで、集熱器のガラス管の軸間距離 S は全て0.1mとし、ガラス管の半径 r_g を0.04m、集熱板の大

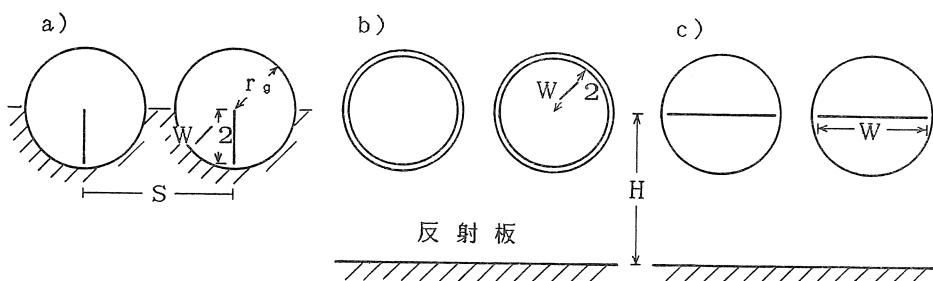


図2 有効透過吸収係数を計算する管型集熱器の断面形状

表1 透過吸収係数を計算するための5つのタイプの管型集熱器の仕様

集熱器	形 状	集 热 板	反 射 板
Type 1	図2 a)	幅W/2の平板（垂直型）	曲面鏡 $\rho_1=0.9$
Type 2	図2 b)	外径Wの円筒	乱反射板 $\rho_2=0.8$
Type 3	図2 b)	外径Wの円筒	平面鏡 $\rho_3=0.8$
Type 4	図2 c)	幅Wの平板（水平型）	乱反射板 $\rho_4=0.8$
Type 5	図2 c)	幅Wの平板（水平型）	平面鏡 $\rho_5=0.8$

きさを表わす $W/2$ を 0.035m , またガラス管の軸から平面反射板までの距離 H を 0.1m とする。

管型集熱器は通常、真空断熱式の集熱器として利用されるため、集熱板とガラス管の間の熱伝達係数がガラス管と外界の間の熱伝達係数と比較して非常に小さくなる。このため、 $(\tau\alpha)_e$ におけるガラスによる太陽光の吸収の効果を無視し、 $(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha)$ (透過吸収係数) とすることができる⁽⁹⁾。簡単のためここでは、 (θ_1, θ_2) で表わされる方向から入射する直達光に対する $(\tau\alpha)$ を、次の条件のもとに計算し管型集熱器の入射角補正因子を求める。

- a) 集熱器はガラス管の軸方向に十分長く、端部の影響を無視する。
- b) ガラス管や集熱板において反射され再び集熱板に入射して来る光の影響を無視する。
- c) 有限の厚さを持つガラス管を光線が透過する場合に起る屈折による光の進行方向の変化を無視する。
- d) 集熱板の太陽光吸収率 α_s は、入射角依存性を持たず、 $\alpha_s=0.9$ であるとする。
- e) 光線が当たるガラス管上のある位置における局所的な透過率は、厚さ 0.002m 、屈折率 1.52 、吸収係数 12 m^{-1} のガラス板に同一の入射角 θ_i で入射した場合の透過率 $\tau_g(\theta_i)$ と等しい。

なおここでは、集熱効率を計算するための集熱面積

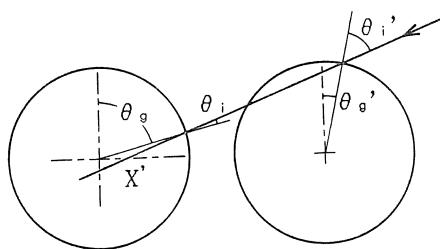


図3 入射光線のガラス管への入射角と入射位置

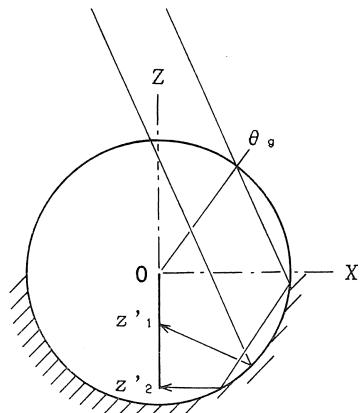


図4 Type 1 の集熱器の反射鏡からの反射光の集熱板への入射位置

の基準として、ガラス管の外径 $2r_g$ を用いて、 $(\tau\alpha)$ を求める。また、以下の数式では簡単のため各種長さをガラス管の半径 r_g により無次元化して用いる。すなわち、 $x'=x/r_g$, $W'=W/r_g$, $S'=S/r_g$, 及び $H'=H/r_g$ として用いる。

図3に示すような X 軸上の x' を通る入射方向が (θ_1, θ_2) の光線のガラス管上における入射位置 θ_g は、次式により与えられる。

$$\theta_g = \sin^{-1} \{ x' \cos^2 \theta_1 + (1 + \cot^2 \theta_1) - x'^2 \cot^4 \theta_1 \}^{1/2} \sin \theta_1 \quad (7)$$

また、隣のガラス管を透過する場合の隣のガラス管における入射位置 θ_g' は、

$$\theta_g' = \sin^{-1} \{ (x' - S') \cos^2 \theta_1 + [1 - (x' - S')^2 \cot^2 \theta_1]^{1/2} \cos^2 \theta_1 \} \quad (8)$$

ガラス管上の位置 θ_g における光線の入射角 θ_i は、

$$\theta_i = \cos^{-1} \{ \cos \theta_2 (\sin \theta_g \sin \theta_1 + \cos \theta_g \cos \theta_1) \} \quad (9)$$

で表わされる。

以下、それぞれの形状の管型集熱器に対する $(\tau\alpha)$ の計算方法を簡単に説明する。

3. 1 Type 1

Type 1 の管型集熱器に入射しガラス管を透過した光は、直接集熱板に到達するか、又はガラス管下部の内面に形成された反射鏡により反射されてから集熱板に到達する。但し、 x' が原点と $W'/(2 \tan \theta_1)$ の間にある場合には、すべての光が直接集熱板に到達する。ここで、図4に示すように、ガラス管上の位置 θ_g を透過し反射鏡により1回反射された光が Z 軸と交わる位置を z'_1 、また2回反射された光が Z 軸と交わる位置を z'_2 とすると、それぞれ次の式により与えられる。

$$z'_1 = \{ \cos(\pi + 2\theta_1 - \theta_g) - \sin(\pi + 2\theta_1 - \theta_g) \cos(3\theta_1 - 2\theta_g) / \sin(3\theta_1 - 2\theta_g) \} \quad (10)$$

$$z'_2 = \{ \cos(4\theta_1 - 3\theta_g) - \sin(4\theta_1 - 3\theta_g) \times \cos(5\theta_1 - 4\theta_g) / \sin(5\theta_1 - 4\theta_g) \} \quad (11)$$

そして、 $-W'/2 \leq z'_1 \leq 0$ 又は $-W'/2 \leq z'_2 \leq 0$ を満たす光が集熱板に到達する。その $(\tau\alpha)$ は次式により与えられる

$$(\tau\alpha) = \{ \int_0^{W'/2 \tan \theta_1} \alpha_s \tau_g(\theta_i) dx' + \int_{-W'/2 \leq z'_1 \leq 0} \alpha_s \rho_1 \tau_g(\theta_i) dx' + \int_{-W'/2 \leq z'_2 \leq 0} \alpha_s \rho_1^2 \tau_g(\theta_i) dx' \} / 2 \quad (12)$$

上式の右辺括弧内の第1項目の積分はガラス管を透過

し直接集熱板に到達する光の量, 第2項目は反射鏡により1回反射されて集熱板に到達する光の量, 及び第3項目は反射鏡により2回反射されて集熱板に到達する光の量を表わす. なお, ガラス管下部の反射鏡に3回以上反射される光は集熱板とガラス管の間を通過し集熱板に到達することはない. また, 光が隣のガラス管を透過して来る場合には, 式(12)の対応する x' の積分範囲の被積分関数に $\tau_g(\theta_i')^2$ を掛けておかなければならぬ.

3. 2 Type 2

Type 2 の形状の管型集熱器の($\tau\alpha$)は、円筒形集熱板の上方からガラス管を透過し直接集熱板に到達する光、及び集熱板の間を通り抜け乱反射板により反射され下方から集熱板に到達する光の寄与の和として求められる、前者の上方から集熱板に到達する光の寄与は、集熱器が存在しない場合に X 軸上で $-W'/(2 \cos \theta_1)$ $\leq x' \leq W'/(2 \cos \theta_1)$ の間を通過する光線であり、次式により計算される。

$$\alpha_s \int_{|x'| \leq W/2 \cos \theta_1} \tau_g(\theta_i) dx' / 2 \dots \quad (13)$$

但し、原点を含む円筒形集熱板に入射する光が隣のガラス管を透過して来る場合には、この光は対応する x' の積分範囲の被積分関数に $\tau_g(\theta_{i'})^2$ を掛けた値となる。また、隣の円筒形集熱板によって入射光が遮断される場合には、その x' の積分範囲において被積分関数が 0 となる。

乱反射板により反射され下方から集熱板に到達する光は、 X 軸上で $W'/(2 \cos \theta_1) \leq x' \leq S' - W'/(2 \times \cos \theta_1)$ の間を通過する。その $(\tau\alpha)$ への寄与は、光が円筒形集熱板の間を通り反射板に達することのできる割合 R_2 、光に照射された反射板から円筒形集熱板への形態係数 F_2 、及び拡散光に対するガラス管の透過率 τ_d から次式により計算される。

$$R_2 \rho_2 F_2 \tau_d \alpha_s / 2 \dots \dots \dots \quad (14)$$

$$R_2 = \int_{W'/2 \cos \theta_1}^{S' - W'/2 \cos \theta_1} z(x') dx' / (S' - W'/\cos \theta_1) \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

ここで、上式の $z(x')$ は、ガラス管を透過しない場合 1, 1 つのガラス管のみを透過する場合 $\tau_g(\theta_i)^2$ 又は $\tau_g(\theta_i')^2$, 2 つのガラス管を透過する場合 $\tau_g(\theta_i)^2 \tau_g(\theta_i')^2$ である。

形態係数 F_2 は、線分から円への形態係数の計算式⁽¹⁰⁾から次式により求められる。

$$F_2 = \sum_{n=-3}^2 (W'/2) |\tan^{-1}\{-W'/(2\cos\theta_1)\} - H'\tan\theta_1 + (n+1)S'\}$$

$$-\tan^{-1} \{W'/(2 \cos \theta_1) - H' \tan \theta_1 + nS'\} | \\ /(S' - W' \cos \theta_1) \dots \dots \dots \quad (16)$$

対象とする円筒形集熱板の前後それぞれ 3 つの集熱板間の間を通過する光以外は十分小さいとして無視する。また、拡散光に対するガラス管の透過率 τ_d は、ガラス管の局所的な透過率 $\tau_g(\theta_i)$ を、ガラス管上の位置 θ_g と光の入射方向に関して平均することにより求められる。すなわち、

$$\tau_d = \iint \tau_i(\theta_i) d\theta_g d\omega / 2\pi^2 \dots \dots \dots \quad (17)$$

以上より Type 2 の太陽集熱器の $(\tau\alpha)$ は、式 (13) と (14) の和として与えられる。

3. 3 Type 3

Type 3 の形状の集熱器の ($\tau\alpha$) は、 Type 2 と同様に、円筒形集熱板の上方からガラス管を透過し直接集熱板に到達する光と、集熱板の間を通り抜け平面鏡により反射され下方から集熱板に到達する光の寄与の和から求められる。上方から直接集熱板に到達する光の ($\tau\alpha$) への寄与は、式 (13) を用いて Type 2 と同様に計算される。平面鏡に反射され下方から集熱板に到達する光の寄与は、 X 軸上の $W'/(2 \cos \theta) < x' < S' - W'/(2 \cos \theta_1)$ を通過し、平面鏡による円筒集熱板の鏡像に入射する光線について、そのガラス管の鏡像における入射位置 θ_g'' 及び入射角 θ_i'' を求めるこことにより計算することができる。すなわち、

$$\begin{aligned}\theta_{g''} &= \sin^{-1}[(x' \cot \theta_1 + 2H') \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\ &\quad - n S' \cos^2 \theta_1 + [(1 + \cot^2 \theta_1) \\ &\quad - \{n S' \cot \theta_1 - (x' \cot \theta_1 + 2H')\}^2]^{1/2} \\ &\quad \times \sin^2 \theta_1] \dots \dots \dots \quad (18)\end{aligned}$$

$$\theta_{i''} = \cos^{-1} \{ \cos \theta_2 (\sin \theta_g \sin \theta_1 + \cos \theta_g \cos \theta_1) \} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

ここで、 n は原点を 0 として数えた n 番めの集熱板の鏡像を表わす。

一方、平面鏡に反射された光の寄与は次式により計算される。

$$\int z(x') \rho_3 \tau_g(\theta_i'') \alpha_s dx'/2 \dots \quad (20)$$

上式の $z(x')$ は式 (15) で用いたものと同じであり、 x' の積分は集熱板の間を通過した光が集熱板の平面鏡による鏡像に入射する範囲で行なう。Type 3 の集熱器の $(\tau\alpha)$ は式 (13) と (20) の和である。

3. 4 Type 4

この形状の平板型集熱板を持つ集熱器の($\tau\alpha$)も、集熱板の上方からガラス管を透過し直接集熱板の上面に到達する光と、集熱板と集熱板の間に通過し乱反射板に反射されて集熱板の下面に到達する光の寄与の和

として求められる。X軸上の $-W'/2 \leq x' \leq W'/2$ を通過する光は、上方から集熱板に直接到達し、その $(\tau\alpha)$ への寄与は次式により与えられる。

$$\int_{|x'| \leq W'/2} \alpha_s \tau_g(\theta_i) dx'/2 \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

積分範囲の x' を通る光が隣のガラス管を透過する場合には、被積分関数に $\tau_g(\theta_i')^2$ を掛けた値となる。なお、Type 4 の太陽集熱器の形状の場合、平板型集熱板が同一平面内に存在するため、Type 2 の場合のように集熱板に入射する光線が隣の集熱板によって遮断されることはない。

集熱板の間 ($W'/2 < x' < S' - W'/2$) を通過する光の $(\tau\alpha)$ への寄与は、光が平板型集熱板の間を通過し乱反射板に到達することのできる割合 R_4 、光に照射された反射板から円筒形集熱板への形態係数 F_4 から次式により計算される。

$$R_4 \rho_4 F_4^4 \tau_d \alpha_s / 2 \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

$$R_4 = \int_{W'/2}^{S' - W'/2} z(x') dx' \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

上式の $z(x')$ は式(15)で用いたものと同じ関数である。形態係数 F_4 は三角形の辺の間の形態係数の計算式⁽¹⁰⁾を利用して次式により与えられる。

$$F_4 = \sum_{n=-3}^2 \left[\left\{ (n-1)S' + H' \tan \theta_1 \right\}^2 + H'^2 \right]^{1/2} \\ + \left\{ (nS' + H' \tan \theta_1)^2 + H'^2 \right\}^{1/2} \\ - \left\{ (nS' - W' + H' \tan \theta_1)^2 + H'^2 \right\}^{1/2} \\ - \left[\left\{ (n-1)S' + W' + H' \tan \theta_1 \right\}^2 + H'^2 \right]^{1/2} / \{2(S' - W')\} \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

ここで、対象とする平板型集熱板の前後それぞれ 3 つの集熱板間の間を通過する光以外は十分小さいとして無視する。Type 4 の集熱器の $(\tau\alpha)$ は式(21)と(22)の和により計算される。

3. 5 Type 5

集熱板の上方からガラス管を透過し直接集熱板の上面に到達する光の $(\tau\alpha)$ への寄与は、Type 4 における式(21)を用いた計算結果と同一である。また、集熱板の間を通過し平面鏡により反射されて平板型集熱板の下面に到達する光の $(\tau\alpha)$ への寄与は、Type 3 における式(20)を用いて計算することができる。すなわち、Type 5 の透過吸収係数は次式によって与えられる。

$$(\tau\alpha) = \int_{|x'| \leq W'/2} \alpha_s \tau_g(\theta_i) dx'/2 \\ + \int z(x') \rho_s \tau_g(\theta_i'') \alpha_s dx'/2 \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

但し、右辺第 2 項は、 $W'/2 < x' < S' - W'/2$ を満たし、しかもその X 軸上の x' を通過した光が平面鏡に

よる集熱板の鏡像に入射することのできる x' の範囲 $\{nS + W'/2 < x' - 2H' \tan \theta_1 < (n+1)S' - W'/2\}$ で積分を行わなければならない。なお、 n は整数を表わす。

4. 入射角補正因子の計算結果及び考察

前記 5 つの形状の管型集熱器について、角 θ_2 を 0 に固定し、角 θ_1 を変化させた場合の透過吸収係数 $(\tau\alpha)$ の計算値を図 5 に示す。ここで、Type 1 の集熱器を例として、 θ_1 による $(\tau\alpha)$ の変化を簡単に説明する。その $(\tau\alpha)$ は、 $\theta_1 = 0 \sim 30^\circ$ において単調に増加する。これは、この θ_1 の範囲で、ガラス管の下部の反射面により 2 回反射されて集熱板に到達する光の割合が徐々に減少し、反射面による反射を受けずに直接集熱板に到達する光の割合が徐々に増加するからである。 $\theta_1 = 30 \sim 40^\circ$ の範囲では、反射面により 2 回反射されて集熱板に到達する光の割合がほぼ 0 となっており、しかも集熱板とガラス管下部の反射面との間を通過して集熱板に到達しない光の割合が増加するため、 $(\tau\alpha)$ が減少する。 $\theta_1 = 40 \sim 48^\circ$ の範囲では、集熱板とガラス管下部の反射面との間を通過する光の割合が減少し 0 に近付くため、 $(\tau\alpha)$ は増加する。 $\theta_1 = 48^\circ$ 付近で、隣のガラス管を透過した光が集熱板に到達するようになり始め、さらにガラス管下部の反射面により、集熱板に直接到達する光を遮断し始めるため、 $(\tau\alpha)$ は急激な減少を開始する。また、 $\theta_1 = 66 \sim 68^\circ$ において、反射面による反射を受けずに集熱板に到達する光のすべてが隣のガラス管を透過したものとなるため、 $(\tau\alpha)$ が極小値を持つ。さらに、 θ_1 が増加すると、隣のガラス管における透過率の最も小さい部分を透過した光が反射面に入射し始め、直接集熱板に入射する光の隣接

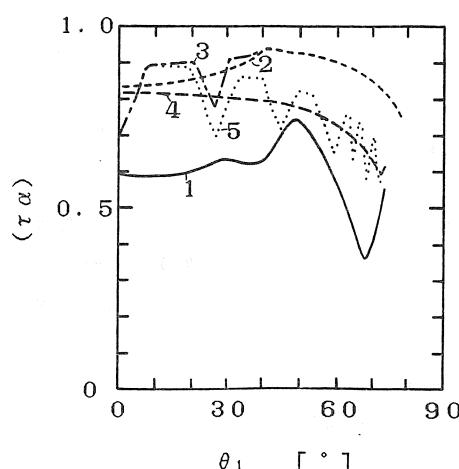


図 5 管型集熱器の透過吸収係数の $(\tau\alpha)$ の角 θ_1 による変化 ($\theta_2=0$)

ガラス管における透過率が大きくなるため、 $(\tau\alpha)$ が増加を始める。

図5に示したそれぞれの集熱器の $(\tau\alpha)$ の角 θ_1 による変化から、管型集熱器の入射角補正因子の角 θ_1 に関する項 $f(\theta_1)$ は、Type 4の形状のものを除き、幾つ

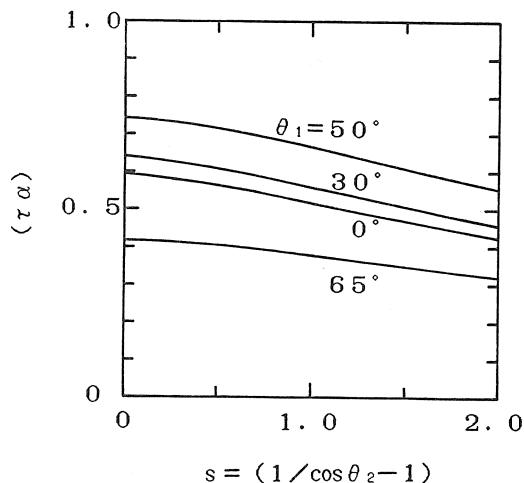


図6 管型集熱器Type 1に関して θ_1 を固定し θ_2 を変化させた場合の透過吸収係数 $(\tau\alpha)$ の変化

かの変曲点を持つため、 $f(\theta_1)$ を θ_1 の関数（例えば $1/\cos \theta_1 - 1$ ）の多項式として正確に近似できないことが明らかとなる。

管型集熱器の $(\tau\alpha)$ の角 θ_1 に対する依存性の一例として、Type 1について角 θ_1 を固定し θ_2 を変化させた場合の $(\tau\alpha)$ の変化を図6に示す。この図より、 $(\tau\alpha)$ が $s=(1/\cos \theta_2 - 1)$ に対してほぼ直線的に変化し、入射角補正因子の θ_2 に依存する部分 $g(\theta_2)$ が、式(5)に示された s の多項式により記述できることが明らかとなる。但し、 $g(\theta_2)$ を記述する s の多項式の係数 b （一次式展開）、及び b_1 と b_2 （二次式展開）は、厳密には θ_1 の関数であり、 θ_1 に従って変化する。Type 1～5の管型集熱器について、 θ_1 を一定値として θ_2 を変化させて計算した $(\tau\alpha)(\theta_1, \theta_2)/(\tau\alpha)(\theta_1, \theta_2=0) = g(\theta_2)$ から、最小自乗法により求めた係数 b 、 b_1 及び b_2 をそれぞれ図7 a)～e)に示す。図に示した係数のグラフは幾つかの変曲点を持ち、それぞれの変曲点は図5に示したそれぞれの入射角補正因子 $f(\theta_1)$ の変曲点に対応する。前述のように $f(\theta_1)$ の変曲点において、集熱板に到達する光が通過する経路が大きく変

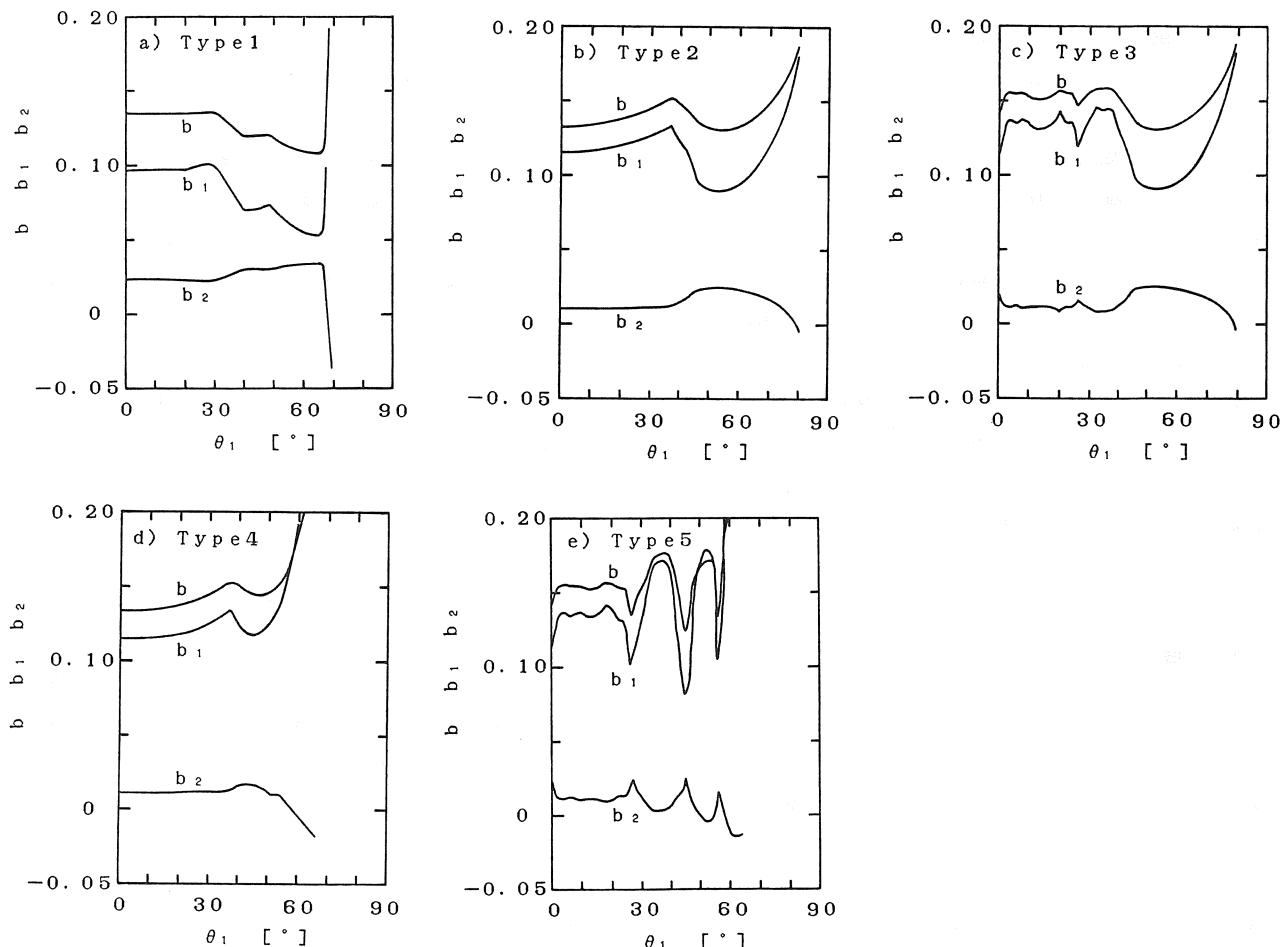


図7 5種の管型集熱器の $g(\theta_2)$ の s による展開係数 b 、及び b_1 、 b_2 の角 θ_1 による変化

化し始め、集熱板に到達するまでに透過するガラス管の数や透過率の平均値が変化するため、係数 b , b_1 及び b_2 が大きな変化を始める。

先に導入した管型集熱器に対する光の入射方向を記述するための 2 つのパラメータ θ_1 及び θ_2 を用いて、入射角補正因子を 2 つの独立な関数 $f(\theta_1)$ 及び $g(\theta_2)$ の積で表わすことができる場合、管型集熱器の集熱効率特性の η 切片値は次式により与えられ、

$$\eta_0 = F'(\tau\alpha)(\theta_1=0, \theta_2=0)f(\theta_1)g(\theta_2) \dots (26)$$

さらに、式(5)の係数 b , b_1 及び b_2 は θ_1 に依存しない一定の値を持つ。入射角補正因子の記述方法による誤差の許容範囲を集熱効率に換算して ± 0.02 とした場合、図 7 a)~e) に示した係数 b の変化は $0 \leq \theta_1 \leq 60 \sim 70^\circ$ においてほぼ ± 0.02 以下であり、この θ_1 の範囲で入射角補正因子は式(4)の形で表わすことができる。ここで一例として、Type 1 の集熱器に関して、係数 b の θ_1 に関する依存性を無視した場合に、 $(\tau\alpha)$ が $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=60^\circ$ において受ける影響 $((\tau\alpha)(\theta_1=60^\circ, \theta_2=0^\circ)\{b(\theta_1=60^\circ)-b(\theta_1=0^\circ)\}s = 0.55 \times (0.109 - 0.135) \times 1.0$ を計算すると約 0.014 である。また、集熱器の 1 日当りの実用的な集熱時間が 8 時間程度であり、太陽赤緯の年間の変化幅が約 47° であることを考慮すると、ここで導入したパラメータ θ_1 及び θ_2 の適用範囲は十分である。

実際に管型集熱器の入射角補正因子を実験により求める場合、透過吸収係数 $(\tau\alpha)$ の θ_1 依存性を表わす関数 $f(\theta_1)$ は、多数の変曲点を持つ複雑な曲線となり $f(\theta_1)$ を θ_1 の関数の多項式で近似することができないため、その変曲点における $f(\theta_1)$ の値を実験により求め変曲点の間を内挿法により近似するなどの方法を採用しなければならない。他方、関数 $g(\theta_2)$ は、式(5)の多項式により正確に近似することができるため、 θ_2 について 3 点（例えば $\theta_2=0, 45, 60^\circ$ ）程度の測定を行うことにより係数 b , b_1 及び b_2 を求めることができる。

5. 結 言

管型集熱器に対する光の入射方向を記述するためのパラメータとして、入射光線の管に垂直な平面への射影と集熱器の法線のなす角 θ_1 及び入射光線の管に垂直な平面への射影と入射光線のなす角 θ_2 を導入し、5 つの形状の管型集熱器のモデルについて透過吸収係数 $(\tau\alpha)$ を計算し、その入射角補正因子について検討した結果、次のことが明らかとなった。

a) 光の入射方向を θ_1 及び θ_2 で記述した場合、入

射角補正因子は $f(\theta_1)$ 及び $g(\theta_2)$ の互いに独立な関数の積で表わすことができる。

b) 関数 $g(\theta_2)$ は $s=(1/\cos \theta_2 - 1)$ の一次又は二次式により表わすことができ、 θ_2 について 3 点程度 $(\tau\alpha)$ を測定することにより、 s の多項式の係数を求めることができる。

c) 関数 $f(\theta_1)$ は幾つかの変曲点を持ち複雑な曲線であるため、理論的に予想される $f(\theta_1)$ の変曲点に対応した θ_1 の値において $(\tau\alpha)$ を測定し、 θ_1 に関する内挿法により、その値を求めなければならない。

記 号

b : 入射角補正因子の $g(\theta_2)$ の s による一次式近似における係数 [—]

b_1 , b_2 : 入射角補正因子の $g(\theta_2)$ の s による二次式近似における一次及び二次項の係数 [—]

F_2 , F_4 : Type 2 及び 4 の集熱器の乱反射板の光に照らされた部分から集熱板の下部への形態係数 [—]

F' : 太陽集熱器効率係数 [—]

$f(\theta_1)$, $g(\theta_2)$: 管型集熱器の入射角補正因子の角 θ_1 及び θ_2 に依存する部分 [—]

H : 管型集熱器における集熱板の中心と平面反射板の距離 [m]

H' : H の r_g による無次元化数 [—]

I : 集熱器に入射する全太陽エネルギー強度 [W/m^2]

R_2 , R_4 : Type 2 及び 4 の集熱器において集熱板の間を通過する光が乱反射板に到達することのできる割合 [—]

r_g : ガラス管の半径 [m]

S : 管型集熱器のガラス管の中心軸間の距離 [m]

S' : S の r_g による無次元化数 [—]

s : $(1/\cos \theta_2 - 1)$ [—]

T_a : 外気温 [K]

T_m : 集熱器内の熱媒体の平均温度 [K]

T^* : 無次元化温度 $U_0(T_m - T_a)/I$ [—]

U_L : 集熱器全熱損失係数 [$\text{W}/\text{K} \cdot \text{m}^2$]

U_0 : 無次元化係数 [$10 \text{ W}/\text{K} \cdot \text{m}^2$]

W : 集熱板フィンの幅 [m]

W' : W の r_g による無次元化数 [—]

x : X 軸上の位置 [m]

z_1 , z_2 : Type 1 の集熱器においてガラス管下

	部の反射鏡によって1回及び2回反射された光がZ軸と交わる位置	[m]
x' , z'	: x 及び z の r_g による無次元化数	[—]
$z(x)$: 管型集熱器の集熱板の間を通過しX軸上の x を通る光が反射板に到達する割合	[—]
α_s	: 集熱板の太陽光吸収率	[—]
η	: 集熱器の集熱効率	[—]
η_0	: 集熱効率特性の η 切片値	[—]
θ	: 天頂角, 集熱器への入射角	[°]
θ_i , $\theta_{i'}$: 着目しているガラス管上の位置 θ_g 及び隣のガラス管上の位置 $\theta_{g'}$ に対する光の局所的な入射角	[°]
$\theta_{i''}$: ガラス管の平面鏡による鏡像上の位置 θ_g'' に対する光の局所的な入射角	[°]
θ_g , θ_g'	: 着目しているガラス管及び隣のガラス管上への光線の入射位置	[°]
θ_g''	: 光線のガラス管の平面鏡による鏡像上への入射位置	[°]
θ_1	: 入射光線のガラス管に垂直な平面への射影と集熱器の法線のなす角	[°]
θ_2	: 入射光線と入射光線のガラス管に垂直な平面への射影のなす角	[°]
ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 , ρ_5	: Type 1, 2, 3, 4 及び 5 の集熱器の反射鏡・板の反射率	[—]
τ	: 集熱器のガラス管の透過率	[—]
τ_d	: 拡散光に対するガラス管の透過率	[—]
$\tau_g(\theta_i)$: ガラス板の入射角 θ_i の光に対する透過率	[—]
$(\tau\alpha)$: 集熱器の透過吸収係数	[—]
$(\tau\alpha)_e$: 集熱器の有効透過吸収係数	[—]
ϕ	: 方位角	[°]

参考文献

- (1) J.E. Hill and E.R. Streed, A Method of Testing for Rating Solar Collector, Solar Energy, 18-5 (1976), 421.
- (2) ASHRAE STANDARD 93-77, Method of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collector, ASHRAE (1977).
- (3) 種村 栄・山東睦夫, 名工試におけるコレクター集熱特性試験法, 名古屋工業技術試験所報告, 26-4 (1977), 93.
- (4) H.D. Talarek, I E A Programme Summary Task 3 Performance Testing of Solar Collectors, Proc. 1981 I S E S Cong., (1981), 876, Brighton, England.
- (5) J. D. Felske, Analysis of an Evacuated Cylindrical Solar Collector, Solar Energy, 22-6 (1979), 567.
- (6) 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, 18 (1982), 62.
- (7) 山東ら, 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, (1984-12), 129, 東京.
- (8) P.H. Theunissen and W. A. Beckman, Solar Transmittance Characteristics of Evacuated Tubular Collectors with Diffuse Back Reflectors, Solar Energy, 35-4 (1985), 311.
- (9) 山東ら, 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, 10-6 (1984), 34.
- (10) R. Siegel and J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, (1974), Ch.7 & 788, McGraw Hill, New York.

(昭和62年6月8日 原稿受理)