

樋型放物面鏡集熱装置の光学的誤差の測定

Optical Error Measurement of the Parabolic Trough Collector

津田 泉*
Izumi TSUDA

Abstract

This paper describes a technique for evaluating the optical error of focusing solar collectors. The total optical error resulting from imperfect specularity and from inaccuracies in reflector position is characterized by an angular standard deviation σ_m , which is the rms deviation of the reflected rays from the design direction. The method is based on the fact that the off-axis performance of a concentrator depends on σ_m . An angular scan is performed; i.e., the collector output is measured as a function of misalignment angle. The total optical error is determined by a least-squares fit between the measured and the calculated angular scan. The components of optical error were measured, in order to clarify the improvements of the focusing collector which was measured.

Key Words : parabolic trough collector, optical error, off-axis measurement

1. 緒 言

太陽エネルギーを熱エネルギーとして利用する場合、そのエネルギー密度は最大で約 1 kW/m^2 程度である。このような低密度のエネルギーをより高温度、高効率で集熱するためには、集光追尾型の集熱装置の使用が望ましい。その一つとして、樋型放物面鏡集熱装置がよく用いられる⁽¹⁾⁽²⁾。電子技術総合研究所が工業技術院筑波第2研究センターに建設した熱・電気複合ソーラーシステム実験設備⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾においても、高温ループの集光追尾型集熱装置として本型式を採用した。

ところで、このような集光集熱装置の光学効率は、使用部材の物理的な光学性能以外に、光学的誤差により影響を受ける。ここでいう光学的誤差とは、集熱装置として設置した状態での種々の誤差で、集光鏡自身の鏡面誤差、集光鏡および集熱管の取り付け位置の誤差、追尾にともなって変化する集光鏡の相対的な位置のずれにともなう誤差、追尾角度のはらつきにともなう誤差等の総和として与えられるものである。

この光学的誤差を知ることにより、集熱装置の追尾角度のばらつきの許容値や、最適集熱管径を知ることができ、集熱装置自体の最適設計が可能となる。また、その内訳を測定すれば、プロトタイプの集熱装置の改良すべき点も明らかとなる。

従来、このような集光集熱装置の光学的誤差についての研究においては、集熱器全体の光学的誤差について実験がなされているが、その光学的誤差の各内訳についての確認がなされていない⁽⁶⁾。そこで、実際に、2台の東西水平配置の樋型放物面鏡集熱装置を使用して、日射計なしで、集熱装置の光学的誤差を測定できることを明らかにするとともに、光学的誤差の内訳について計測を行い、現在使用している集熱装置の改良すべき点を見いだしたので報告する。

2. 光学的誤差の評価方法

集熱装置の光学効率 η_{op} は次式で与えられる⁽⁷⁾

ここで、

r : 集光鏡の反射係数, τ : 集熱管のカバーガラスの透過係数, α : 集熱管の吸収係数, A : 有効面積率, $\eta_{op'}$: 光学的誤差 σ_m による集光効率 ($r=1.0$, $\tau=1.0$, $\alpha=1.0$, $A=1.0$ の場合での光学効率) である.

集熱装置の熱平衡状態でのエネルギーバランスは、次式となる。

$$C_R F_R(T_{out} - T_{in}) = F' A_p \{ \eta_{op} r_c I_d \cos \omega t \\ - U_L(T_F - T_A) \} \dots (2)$$

* 電子技術総合研究所 研究官
Electrotechnical Laboratory Technical Official

ただし、

C_R : 集熱装置熱媒比熱($J/^\circ K kg$), F_R : 集熱装置熱媒流量(kg/sec), T_{out} : 集熱装置熱媒出口温度($^\circ K$), T_{in} : 集熱装置熱媒入口温度($^\circ K$), F' : フィン効率(本論文の集熱管においては, $F' = h/(h + U_L)$), h : 集熱管と熱媒との間の熱伝達係数), A_p : 集熱管表面積(m^2), U_L : 集熱装置の熱損失係数($W/m^2 K$), T_F : 集熱装置の熱媒平均温度($= (T_{out} - T_{in})/2$)($^\circ K$), T_A : 気温($^\circ K$), r_c : 集熱装置の集光比(集熱面積(m^2)) / 集熱管表面積(m^2)), I_d : 法線面直達日射強度(W/m^2), ωt : 南中時を0とした太陽時の時角(rad.)である。なお、この場合、集光比が約15であることから、散乱光による影響は無視した。

ゆえに、集熱装置の集熱効率 η は熱平衡状態では次式で与えられる。

$$\eta = F' \left\{ \eta_{op} - \frac{U_L(T_F - T_A)}{r_c I_d \cos \omega t} \right\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

(3)式から、光学効率 η_{op} は、次式となる。

$$\eta_{op} = \frac{\eta}{F'} + \frac{U_L(T_F - T_A)}{r_c I_d \cos \omega t} \quad \dots \dots \dots (4)$$

仮に、集熱装置が2台あり、一方の集熱装置を人為的な追尾されない状態で追尾させ、他方の集熱装置の追尾を δ_t だけ人為的にずらして追尾させるものとして両者の光学効率の比をとると(5)式のようになる。

$$\frac{\eta_{op}(\delta_t)}{\eta_{op}} = \frac{\{(r_c I_d \cos \omega t) \eta / F' + U_L(T_F - T_A)\}_B}{\{(r_c I_d \cos \omega t) \eta / F' + U_L(T_F - T_A)\}_A} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、添字Aは正常追尾の集熱装置、添字Bは追尾を δ_t だけ人為的にずらせた集熱装置の値であることを示している。したがって、人為的な追尾されないときを基準とする光学的誤差による集光効率 η_{op}' の変化は、

$$\frac{\eta_{op}'(\delta_t)}{\eta_{op}'(0)} = C \cdot \frac{\eta_{op}(\delta_t)}{\eta_{op}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ただし、Cは両者の集熱装置の追尾の人為的なずれがないときの光学効率の比であり、次式となる。

$$C = \frac{\eta_{op}}{\eta_{op}(0)} = \frac{\{(r_c I_d \cos \omega t) \eta / F' + U_L(T_F - T_A)\}_A}{\{(r_c I_d \cos \omega t) \eta / F' + U_L(T_F - T_A)\}_{B_0}} \quad \dots \dots \dots (7)$$

もし、 $F' \approx 1.0$ ならば、集熱装置出力と熱損失の和の比が、 η_{op}' の追尾のずれ角 δ_t に対する変化を示すことになる。(6)式と付録の(A-6)式から光学的誤差を知ることができる。このことから、2台の集熱装置を使用し、1台を正常に追尾させ、1台の追尾を人為的にずらせて集熱実験を行い、集熱装置の全体として

表1 東西水平配置樋型放物面鏡集熱装置の諸元

仕様項目	諸元
1基の集熱面積	108m ² /基 (3.0m × 36.0m)
集光鏡	
幅	3,000mm
長さ	1,000mm
焦点距離	950mm
構成鏡体	F R P スキンペーパーハニカムコア
構成鏡面	0.7mm 厚ガラス銀裏面鏡
集熱管	
集熱カブセル	K-Sガラス真空封じきり
ガラス外径	120mmφ
長さ	3,000mm
吸収管外径	50.8mmφ
選択吸収面材質	基材: S U S, 表面: ZrCx
均熱補強管外径	40.0mm
追尾駆動原動機	ステッピングモータ
追尾方式	プログラム角度計算式センサ補正式 併用一軸追尾方式
耐風速条件	
性能保証風速	平均風速 4m/sec
待避風速	平均風速 20m/sec
破壊耐力	瞬間最大風速 50m/sec

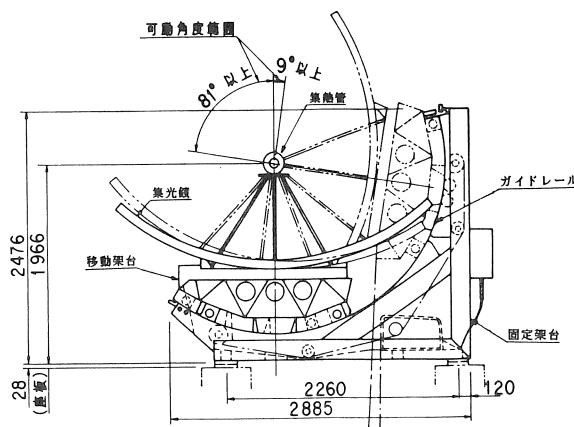


図1 東西水平配置集熱装置の側面図

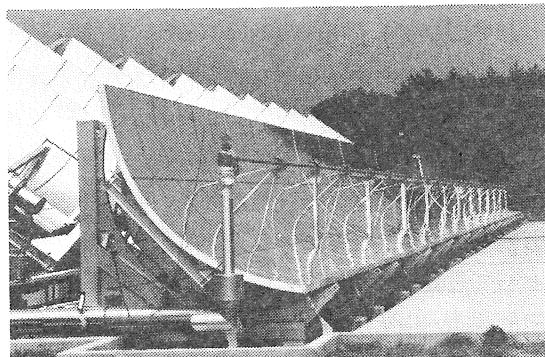


図2 東西水平配置集熱装置の外観

の光学的誤差を求めることができる。

3. 光学的誤差の測定

表1に実験に使用した東西水平配置樋型放物面鏡集熱装置の概要を示す。1基の集熱装置は3m開口 × 6

m長さの集熱装置6台から構成されている。図1に1台の集熱装置の側面図を示し、図2に集熱装置全体の外観を示す。集熱管は固定架台に固定されており、集光鏡がこの集熱管を中心として、固定架台にとりつけられたガイドレールに沿って円運動をするものである。集熱管は円筒二重管であり、熱媒は内管と外管との間を流れる。

集熱装置の熱損失を求めるために、集熱装置の熱損失係数 U_L を測定する。(2)式からわかるように、 $I_d=0$ であれば、 $F'U_L$ を測定できるので、夜間に放熱実験を行った。集熱装置の熱媒入口温度は約100°C~220°Cの範囲で、集熱装置の熱媒流量は0.21~0.29 kg/secで実験を行なった。集熱管の外壁の厚さは0.5 mmと薄く、かつ、この流量範囲では $h^{(8)}$ は数百W/m²Kであるため集熱管の熱抵抗は無視できるので、熱媒平均温度と集熱管平均温度は等しいとした。その結果を図3に示す。図からわかるように、熱損失係数の温度依存性は直線的である。

集熱実験は、1基の集熱装置を基準として正常な追尾を行い(A集熱装置)、もう1基の集熱装置(B集熱装置)は追尾をずらし終日行った。

実験において集熱装置の入口温度は約170°C、熱媒流量はA集熱装置が0.29 kg/sec、B集熱装置が0.28 kg/secにした。 h は500 W/m²K程度となる⁽⁸⁾。

図3からわかるように U_L は h に比べて十分小さいため、 $F' \approx 1.0$ が成り立つ。ゆえに、(6)(7)式からわかるように、追尾をずらしたものとそうでないものとの集熱装置出力と熱損失の和の比から集光効率の追尾ずれ δ_t による変化を知ることができる。

図4は、集熱装置が熱的に安定しておりかつ日射強度の安定している状態における南中時付近での、集熱装置出力と熱損失の和の比を δ_t に対して整理した結果である。熱損失の計算にあたり、 U_L は図3に示した値を使用した。図中の破線は、実験結果に基づき最小自乗法により求めた光学的誤差 $\sigma_m(=0.93^\circ)$ における追尾のずれがないときを基準とした相対的な η_{op}' の変化を示している。

4. 各種の誤差の測定と光学的誤差への影響

前章で得られた光学的誤差を確認するために、鏡面の誤差、鏡面および集熱管の取り付け誤差、追尾にもなう鏡面および集熱管のずれ、追尾誤差の測定結果とその光学的誤差への影響について述べる。

4.1 鏡面誤差

鏡面誤差の測定においては、表2に示す諸元を持つ

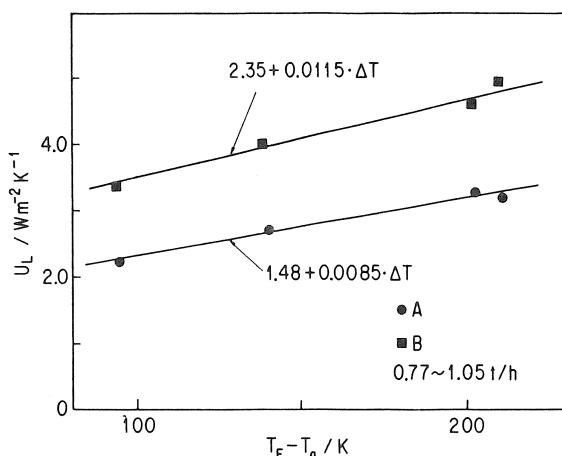


図3 集熱装置の熱損失係数の測定

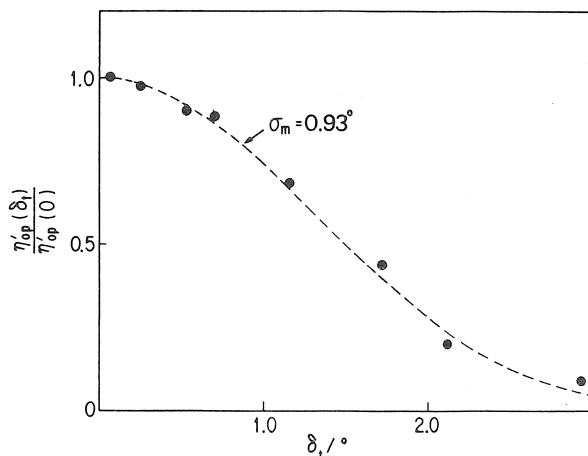


図4 追尾ずらしにともなう集光効率の変化

表2 集光鏡光軸試験装置諸元

項目	諸元
レーザービーム下の高さ	2,000mm
有効走査範囲	3,500mm × 3,000mm
レーザービーム直径	1.3mmφ
レーザービーム広がり角	0.8m rad (=0.046°)
レーザービーム照射方向誤差	±1.0m rad (=0.057°)

集光鏡光軸試験装置⁽⁹⁾を使用した。この装置は、集光鏡の焦線上に回転可能な目盛り付き検出板を設定して、集光鏡の光軸に平行なレーザー光線の鏡面での反射光の焦線からのずれを検出板によって測定する。そのずれと測定点から焦線までの距離から角度偏差を求める。測定精度は0.07°以下である。

集光鏡は開口3,000mm、幅1,000mmであり、実験に使用した集熱装置はそれぞれ36枚の集光鏡を使用している。この72枚の集光鏡のうち5枚を抜取り、鏡面誤差の測定を行った。測定点は集光鏡の光軸に垂直な面（正常に追尾しているときの太陽に対する投影面）を一辺の長さが50mmの正方格子に区切った格子点で、1枚の集光鏡に対して1,140点であった。その結

果を表3に示す。表からわかるように鏡面誤差の標準偏差は 0.32° 程度であるが、一枚の鏡面全体の反射のずれ角の平均値は最大で 0.44° であった。このずれは集光鏡の凹部の寸法上の中心と光学上の中心がずれていることに対応している。集光鏡の取り付けの際にはこのずれに無関係に取り付けられるので、このずれ角の平均値による影響を考慮する必要がある。ずれ角の平均値の標準偏差の不偏推定量は、母集団の平均値が未知であることから次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X_a)^2 \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 N :標本数、 X_i :一枚の集光鏡のずれ角の平均値、 X_a : X_i の標本平均である。この標準偏差の値は 0.36° であり、平均値は 0.10° である。

したがって、鏡面誤差としては鏡面自体の標準偏差 0.32° とずれの平均値の標準偏差 0.36° の幾何平均として 0.48° となる。

4.2 集光鏡および集熱管の取り付け誤差

集光鏡および集熱管の取り付け誤差としては次の2つがある。

- 理想的に取り付けられたとした集光鏡に対する集熱管の取り付け位置の誤差 (Δx , Δy)
- 理想的に取り付けられたとした集光鏡に対する実際の集光鏡の取り付け角度の誤差 ($\Delta\theta_M$)

これらの値の測定は、集熱装置の光軸が天頂方向を向いているときに測定した。測定精度は 0.05° 以下である。

Δx , Δy による光学的誤差への影響は次のようになる。図5の配置において、集熱管の取り付け位置が焦線Cに対して Δx , Δy だけずれると鏡面上の1点A(x , y_0)から見たときの角度のずれ δ_{xy} は、

$$\delta_{xy} = \tan^{-1}\left(\frac{y_0 + \Delta y}{x + \Delta x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_0}{x}\right) \dots \dots \dots (9)$$

となる。ここで、 $y_0 = F - x^2/4F$ である。なお、 δ_{xy}

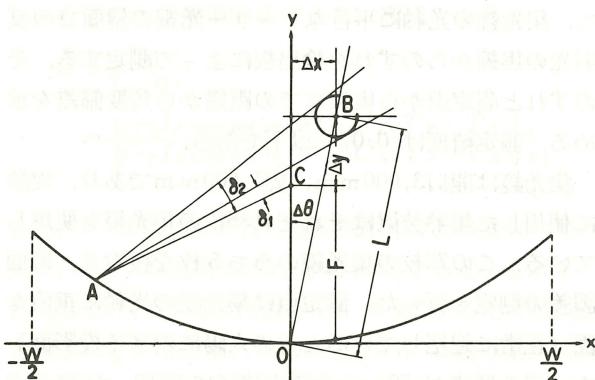


図5 集熱装置断面図

表3 集光鏡鏡面精度測定結果

鏡体番号	鏡面精度 (°)
B110-028	0.24 ± 0.30
B111-051	-0.10 ± 0.31
B112-084	0.35 ± 0.33
B111-050	0.44 ± 0.31
B111-073	-0.44 ± 0.35

は図5の $\angle CAB$ である。

したがって、 δ_{xy} の鏡面全体での標準偏差 Δ_{xy} は、

$$\Delta_{xy} = \left\{ \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} \delta_{xy}^2 dx \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (10)$$

となる。

Δx , Δy の光学的誤差に及ぼす影響 σ_{xy} は(9) (10) (11) 式を用い、 Δx , Δy の分布を正規分布と仮定して、求める。

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\int_{X_a-3\sigma_x}^{X_a+3\sigma_x} g_x(\Delta x) \left(\int_{Y_a-3\sigma_y}^{Y_a+3\sigma_y} g_y(\Delta y) \Delta_{xy} dy \right) dx} \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 X_a : Δx の平均値、 σ_x : Δx の標準偏差、 Y_a : Δy の平均値、 σ_y : Δy の標準偏差であり、

$$g_x(\Delta x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_x} \exp\left(-\frac{(X_a - \Delta x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \dots \dots \dots (12)$$

$$g_y(\Delta y) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y} \exp\left(-\frac{(Y_a - \Delta y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \dots \dots \dots (13)$$

である。

Δx , Δy の測定結果は、 $\Delta x = 0.8 \pm 3.3$ mm, $\Delta y = 5.0 \pm 2.5$ mm であった。測定点数は一基当たり 24 点であった。(11)式より σ_{xy} は 0.21° であった。

$\Delta\theta_M$ を測定するためにセオドライト（日本光学工業 NT-5A）を使用して計測を行った。まず、集熱装置として設置されている状態で、集光鏡の頂点のうち3点(A, B, C)の相互の距離を測定する。次に図6に示すように、集熱装置から $2 \sim 3$ m離れた地点にセオドライトを設置して、セオドライトの設置点からみた前述の集光鏡の3頂点の水平角($A \parallel$, $B \parallel$, $C \parallel$)と垂直角($A \perp$, $B \perp$, $C \perp$)を測定する。セオドライトの設置点を原点として、3頂点相互の距離が測定値と一致し、かつその頂点の水平角と垂直角がセオドライトで測定した値と一致するように3頂点の x , y , z 座標を求める。その3点により、鏡体が理想的であるとして $\Delta\theta_M$ を決定する。

$\Delta\theta_M$ の測定結果を表4に示す。これによる光学的誤差への影響の標準偏差は 0.22° となる。

集熱管と集光鏡の取り付け誤差による光学的誤差への影響 σ_0 は、 $\Delta\theta_M$ による影響 0.22° と $\sigma_{xy}(=0.21^\circ)$

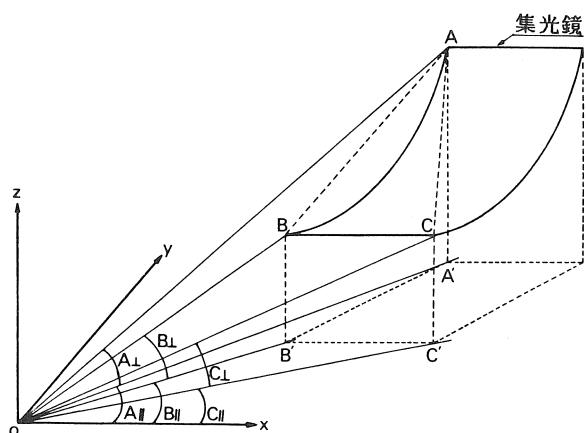


図6 集光鏡の取り付け誤差についての測定方法

表4 $\Delta\theta_M$ の測定結果

集熱器番号及び鏡体番号	追尾角度(°)	$\Delta\theta_M$ (°)
No.10 B112-083	-0.04	0.3
No.10 B112-085	-0.04	-0.2
No. 8 B109-006	0.00	-0.1
No. 8 B111-067	0.00	0.0

表5 追尾に伴う集熱管と集光鏡のずれ

集熱器番号及び鏡体番号	追尾角度(°)	$\Delta\theta$ (°)	L(mm)
No.10 B112-083	29.96	0.4	956
	60.15	0.5	954
No.10 B112-085	29.96	-0.1	949
	60.15	-0.7	947
No. 8 B109-006	29.96	-0.1	954
	60.02	-0.7	956
No. 8 B111-067	29.96	-0.8	942
	60.02	-0.4	952

の幾何平均となるから 0.30° となる。

4. 3 集光鏡の追尾にともなうずれ

追尾にともなうずれは、ガイドレールや移動架台の工作精度、取り付け精度等により追尾にともなって生じるずれである。

前項の $\Delta\theta_M$ の測定と同じ方法により、追尾角度が 30° , 60° の場合について、集光鏡の各頂点の x y z 座標を求めた。その結果に基づき、図5に示す $\Delta\theta$ と L を求めた。なお、追尾角度は集熱装置の光軸と天頂からの垂線となす角で、南側を正とする。4.2 項の測定精度と同一である。

測定結果を表5に示す。これは2台の集熱装置の各々の2枚の鏡について行ったものである。追尾角度の値により $\Delta\theta$ と L の値が異なるということは次のような原因が考えられる。回転の中心と集熱管の中心との間の設定誤差の存在、ガイドレール自体の精度の悪さ、移動架台の精度の悪さ等である。

本集熱装置設置場所（北緯 $36^\circ 10'$ ）での年間を通

じての平均としての追尾角度は約 36° であるから、 $\theta = 30^\circ$ でのずれを見ると、 $\Delta\theta = -0.15 \pm 0.49^\circ$, $L = 950 \pm 6.2$ mm となる。

L のばらつきによる光学的誤差への影響は、(11)式において $\Delta x = 0$ として計算し、 0.27° となる。

$\Delta\theta$ の平均値によるものは、 $\Delta\theta$ の平均値を図5からわかるように Δx に換算し、 $\Delta y = 0$ とし、(10)式により計算すると、 0.10° となる。

ゆえに、追尾に伴う集光鏡のずれによるもの σ_1 は $\Delta\theta$ の標準偏差によるもの (0.49°), L のばらつきによるもの (0.27°), $\Delta\theta$ の平均値によるもの (0.10°) の幾何平均であるから 0.57° となる。

4. 4 追尾誤差

人為的な追尾のずれがない状態でも、追尾の駆動方法等により追尾角度はばらつく。追尾角度の誤差の測定は、集熱装置に付いている角度センサーでは機構上追尾誤差を確認できないため、太陽光線による集熱管の集光鏡上の投影の中心と集光鏡の凹部の寸法上の中心（図5の原点）との偏差から算出した。測定精度は 0.04° 以下である。

1基の集熱装置は6台で構成され、各1台ごとに駆動部があるため、1台ごとに追尾のばらつきがあった。2基の集熱装置で、追尾誤差については差異がなかった。そのばらつきの標準偏差は平均としては 0.1° 程度であったが、最大では 0.14° であった。なお、集熱管の取り付け誤差のうち、 x 方向の偏差により、この測定は $\pm 0.2^\circ$ (4.2節の $\Delta x = 0.8 \pm 3.3$ mm に対応) の誤差を含むため、追尾誤差による光学的誤差に対する影響は両者の幾何平均として $\sigma_t = 0.22^\circ$ と考えられる。

5. 考察

$\sigma_m = 0.93^\circ$ における η_{op}' は図A-1より 0.82 である。ところで、実験に使用した集熱装置は $r = 0.95$, $\tau = 0.92$, $\alpha = 0.88$, $A = 0.95$ である⁽¹¹⁾ため、汚れがなくかつ人為的な追尾のずれがないとした場合の光学効率 η_{op} は 0.60 となる。また、実験より集熱装置の人為的な追尾のずれのない状態での集熱効率は、B集熱装置で $\eta = 0.542$ ($I_d = 743$ W/m², $T_F = 201.5^\circ\text{C}$, $T_A = 9.9^\circ\text{C}$, 集熱装置流量 $Q = 0.27$ kg/sec の条件) となり、 $F' \approx 1.0$ より、(3)式から光学効率を計算すると $\eta_{op} = 0.61$ となる。これは、 $\sigma_m = 0.93^\circ$ として推定された光学効率とよく一致している。したがって、この集熱装置の光学的誤差は 0.93° と考えられる。

表 6 光学的誤差の内訳

項目		測定値 (°)
集光鏡の鏡面精度	σ_M	0.48
集光鏡と集熱管の取り付け精度	σ_O	0.30
追尾に伴う集光鏡と集熱管のずれ	σ_1	0.57
追尾精度	σ_T	0.22
光学精度	σ_m	0.83

$$\sigma_m^2 = \sigma_M^2 + \sigma_O^2 + \sigma_1^2 + \sigma_T^2$$

また、4章で得られた各種の光学的誤差の内訳を表6に示す。表からわかるように、集熱装置全体としての光学的誤差は0.83°となり、追尾をずらすことにより測定された値(0.93°)に比べると小さい。これは、以下に述べる項目の影響と考えられる。

- 集光鏡の鏡体を理想的としたこと
- 集熱管の熱的な変形

これから、追尾を人為的に一定角度ずつずらせて、集熱実験を行い、集光効率の変化を求ることにより、光学的誤差を測定できることが確認された。さらに、光学的誤差の内訳を調べた結果その誤差としては、追尾に伴う集光鏡のずれによるものと集光鏡の鏡面誤差、特にその寸法上の中心と光学上の中心とのずれが大きな割合を占めていることがわかった。

6. 結 論

樋型放物面鏡集熱装置の光学的誤差の測定方法とその内訳について論述した。

その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 集熱装置の光学的誤差の測定が、2台の集熱装置を使用することにより日射計なしで行うことができる方法を開発した。
- (2) 光学的誤差の測定結果は $\sigma_m = 0.93^\circ$ であり、その内訳の測定結果より、追尾に伴う集光鏡のずれによるものと集光鏡の鏡面誤差、特にその寸法上の中心と光学上の中心とのずれが大きな割合を占めていることがわかった。

今後、樋型放物面鏡集熱装置として1つの架台上に集熱管と集光鏡を固定して架台を動かすことにより追尾する機構の集熱装置を作り、低コスト化、高性能化を図る予定である。

7. 謝 辞

本論文をまとめるに当たり、貴重な助言をして頂いた谷辰夫室長と清水定明主任研究官に感謝する。

参 考 文 献

- (1) J. A. Leonard and S. Thunborg, Solar

Total Energy Program, Sandia Laboratories, SAND 74-0391, Dec. (1874)

- (2) 藤原正純・田尻耕治・深沢和則, 米国における太陽熱集熱技術の開発動向, 太陽エネルギー, 13-3 (1987), 17-24
- (3) 田中忠良・沢田慎治・津田 泉・谷 辰夫, 热・電気複合ソーラシステムの研究(第1報 実験設備の構成と基礎特性), 電学論B 104-8 (1984), 505-512
- (4) 田中忠良・津田 泉・沢田慎治・谷 辰夫, 热・電気複合ソーラシステムの研究(第2報 実験設備の電気負荷優先モードにおける運転特性), 電学論B 104-8 (1984) 513-520
- (5) 田中忠良・津田 泉・谷 辰夫, 热・電気複合ソーラシステムの開発(電気負荷優先モードにおける実験結果), 電学論B 105-6 (1985), 523-530
- (6) P. Bendt, H. Gaul and A. Rabl, Determining The Optical Quality of Focusing Collectors without Laser Ray Tracing, ASME Journal of Solar Energy Engineering, 102 (1980), 128-133
- (7) J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Energy Thermal Processes, John Wiley & Sons (1974), 190
- (8) W. M. Rohsenow and J. P. Hartnett, Handbook of Heat Transfer, McGraw Hill (1973), 7. 103
- (9) 作田宏一・谷 辰夫・沢田慎治・田中忠良・堀米 孝, 集光鏡光軸試験装置と集光特性の一評価法, 日本太陽エネルギー学会第2回研究発表講演論文集(1976-12), 25-28
- (10) 岡田, 統計学概論, 共立出版 (1972), 87-90
- (11) 田中忠良・沢田慎治・作田宏一・津田 泉・谷 辰夫, 太陽熱発電技術特集(II-2), 電子技術総合研究所彙報 47-5 (1983), 50

(付録) 集光効率に対する人為的な追尾ずれの影響

樋型放物面鏡集熱装置の集光鏡と集熱管が図5に示すように配置されているとする。図において、B点は集熱管の中心、C点は集熱鏡の焦線である。まず、y軸は放物面鏡の光軸と一致している($\Delta\theta=0$)とする。集光鏡上の1点Aでの反射による集光効率 $\eta_A(x)$ は、

$$\eta_A(x) = \int_{\delta_1 - \delta_t}^{\delta_2 - \delta_t} f_A(\delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_2} f_A(\delta + \delta_t) d\delta \quad (\text{A-1})$$

である。ここで、 δ : A点と焦線を結ぶ直線を基準とした角度, δ_1 : A点と焦線を結ぶ直線とA点から集熱

管への1つの接線とのなす角度, δ_2 : A点と焦線を結ぶ直線とA点から集熱管へのもう1つの接線とのなす角度, δ_t : 人為的な追尾のずれ, $f_A(\delta)$: A点での太陽光線の反射光の焦線方向 ($\delta=0$) からのずれの確率密度関数である。

$f_A(\delta)$ は、太陽の大きさによる太陽光線の分布と集光系の光学的誤差による分布の2つのそれぞれ独立な確率分布の和であたえられる。したがって、 $f_A(\delta)$ は各々の分布のたたみこみ(convolution)によってあたえられ、(A-2)式となる。

$$f_A(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(\delta - \delta') \cdot f_m(\delta') d\delta' \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(\delta') \cdot f_m(\delta - \delta') d\delta' \dots \dots \quad (A-2)$$

ここで、 $f_s(\delta)$: 太陽からの直達光線の線集光型の集熱装置に対する確率密度関数, $f_m(\delta)$: 集熱装置の光軸に平行な光線の鏡面での反射光の焦線方向からのずれの確率密度関数である。

集光系の光学的誤差 σ_m は、鏡面誤差、集熱管及び集光鏡の設定誤差、追尾誤差等の総和である。それらの各誤差分布を正規分布と仮定すると、全体としての分布は標準偏差 σ_m の正規分布となり、(A-3)式のように与えられる。

$$\sigma_m^2 = \sigma_M^2 + \sigma_0^2 + \sigma_1^2 + \sigma_T^2 \dots \dots \dots \quad (A-3)$$

ここで、 σ_M : 集光鏡の鏡面誤差による誤差角, σ_0 : 集光鏡と集熱管の取り付け誤差による誤差角, σ_1 : 追尾にともなう集光鏡と集熱管のずれによる誤差角, σ_T : 追尾誤差角である。なお、 σ_T は δ_t を含まない機械的ながたなどによる追尾誤差角である。それゆえ、(A-3)式の $f_m(\delta)$ は、

$$f_m(\delta) = \frac{1}{\sigma_m(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_m^2}\right) \dots \dots \quad (A-4)$$

となる。

また、太陽からの直達光線の角度分布を視半径 r_s ($=0.267^\circ$) の円板と同一の分散を持つ正規分布と仮定すると、たたみこみは各々の分散の和を分散とする正規分布となるから、 $f_A(\delta)$ は次式となる。

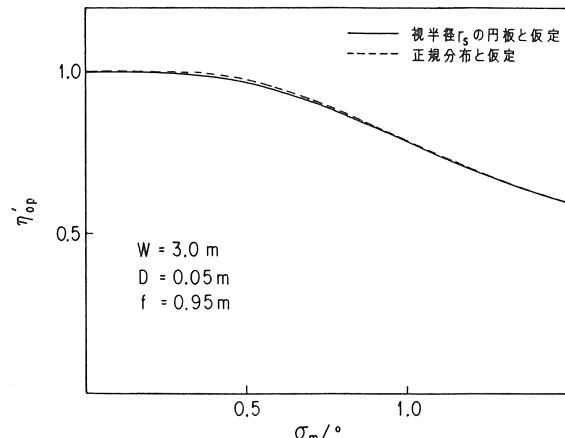
$$f_A(\delta) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_{SM}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_{SM}^2}\right) \dots \dots \quad (A-5)$$

ただし、 $\sigma_{SM}^2 = \sigma_m^2 + (r_s/2)^2$ である。

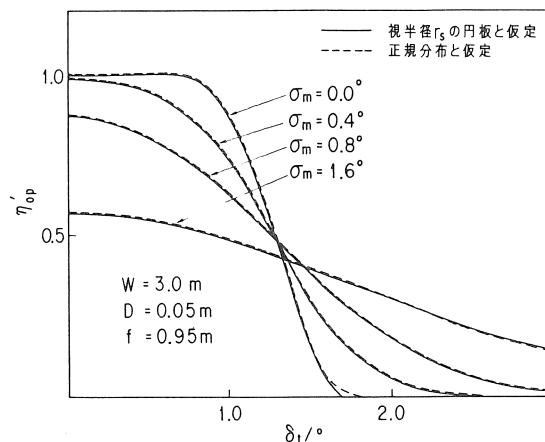
よって、 $\eta_{op'}(\delta_t)$ は図5からわかるように、 $\eta_A(x)$ の $-W/2 \sim W/2$ の平均値として求められるために次式となる。

$$\eta_{op'}(\delta_t) = \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} \eta_A(x) dx \dots \dots \quad (A-6)$$

図A-1に、 $\delta_t=0$, 集熱鏡の開口長 $W=3.0\text{m}$, 集光鏡の焦点距離 $F=0.95\text{m}$, 集熱管の直径 $D=50\text{mm}$ の条件で集熱管の中心が焦線に一致しているとしてシンプソン則による(A-6)式の計算結果(破線)



図A-1 光学的誤差の集光効率におよぼす影響



図A-2 光学的誤差の集光効率におよぼす影響
(追尾をずらしたとき)

である。また、実線は、太陽からの直達光線の分布を視半径 r_s の円板と仮定して計算した結果である。図からわかるように、どちらの分布においてもほぼ同じ結果が得られている。 $\sigma_m \leq 0.4^\circ$ では η'_{op} はほぼ 1.0 であるが、それ以上では減少し、 $\sigma_m = 1.0^\circ$ で 0.78, $\sigma_m = 1.5^\circ$ で 0.60 と減少している。これから、 $\sigma_m \leq 0.4^\circ$ の場合には、光学的誤差の値を知ることができないことがわかる。

次に、追尾を人為的に δ_t だけずらせた場合について、図A-1と同じ集熱装置の条件での計算結果を図A-2に示す。この図において、図A-1と同様に実線は太陽を一様輝度の円板とした場合、破線はそれと等しい標準偏差を持つ正規分布で太陽光線の角度の確率密度を仮定した場合をそれぞれ示す。図からわかるように、両者はよく一致しており、正規分布による近似でもよい近似であることを示している。図からわかるように、 σ_m の相違により η'_{op} の δ_t に対する変化が異なるから、 $\sigma_m \leq 0.4^\circ$ の場合でも、光学的誤差の値がわかる。

(昭和62年11月9日 原稿受理)