

平面鏡群による集光量の計算法について

Computational Program for the Solar Energy
Collected by Heliostats

井 上 孝 太 郎*

Kotaro INOUE

坂 本 健**

Takeshi SAKAMOTO

概 要

太陽熱発電プラントの集光系の平面鏡による集光量の計算プログラムを開発した。このプログラムでは、平面鏡が陰になる割合および反射された光が集光部へ行く途中で遮られる割合をモンテカルロ法を使って計算する。こうすることによって計算のアルゴリズムが簡単化されている。また、計算所要時間も妥当なものになっている。本論文では、このプログラムの構成と計算精度についての検討結果を示してある。

Summary

A computational program has been developed for the calculation of solar energy collected by heliostats in a solar energy power station.

Monte Carlo simulation is used for calculating the fraction of the solar energy interrupted by neighbouring heliostats or other components before or after being reflected by the heliostats. This method simplifies the algorithm of the program.

This paper describes the outline of the program as well as the discussion on the accuracy of it.

1. 緒 言

我々は、太陽熱発電プラントの集光系として、平面鏡と曲面鏡（楕形の放物面鏡）を併用する「平面一曲面併用集光方式」を提案し、検討を進めてきた。この方式では、南向きに傾斜したスタンド上に設置した多数の平面鏡により太陽光をまず前方（南側）のスタンドの裏側に設置した放物面鏡（複数個）に集め、さらにその放物面鏡で焦点近傍の集熱管に集めることにより、比較的小型でも高い集光比が得られる。

この方式の集光系の設計では、平面鏡に入り、平面鏡で反射されて放物面鏡に向う太陽光の量と、太陽光が熱に変換される効率の計算が重要である。後者は、平面鏡および放物面鏡での反射、集熱管での光から熱への変換等の各段階における効率の計算を含むが、これらは、物性値が明らかならば、計算自体はそれほど複雑ではない。これに対し、前者の太陽光の量の計算は、平面鏡と太陽光のなす角度が平面鏡ごとに時間変化する事、さらに平面鏡の一部が隣接する平面鏡や他の構造物（主にスタンド）の陰になったり、平面鏡

で反射された光が放物面鏡に向う途中で隣接する平面鏡によって遮られたりし、その割合も平面鏡ごとに時間変化するため容易でない。そこで、モンテカルロ法を使って計算するプログラム SECH-I (Solar Energy Collected by Heliostats-Version I) を開発した。以下、このプログラムの対象とする「平面一曲面併用集光方式」の概要、プログラムの構成、および計算精度について述べる。なお、このプログラムは、平面鏡によって太陽光をタワー上の集光部に集める、いわゆる「タワー集光方式」に適用することも可能である。

2. 平面一曲面併用集光方式の概要

図1に「平面一曲面併用集光方式」の設計例を示す。この設計では、45度に傾斜したスタンドの上にタ

* 日立製作所原子力研究所 主任研究員
Atomic Energy Research Laboratory, HITACHI
Ltd. Senior Researcher

** 日立製作所日立研究所 研究員
Hitachi Research Laboratory, HITACHI Ltd.
Researcher

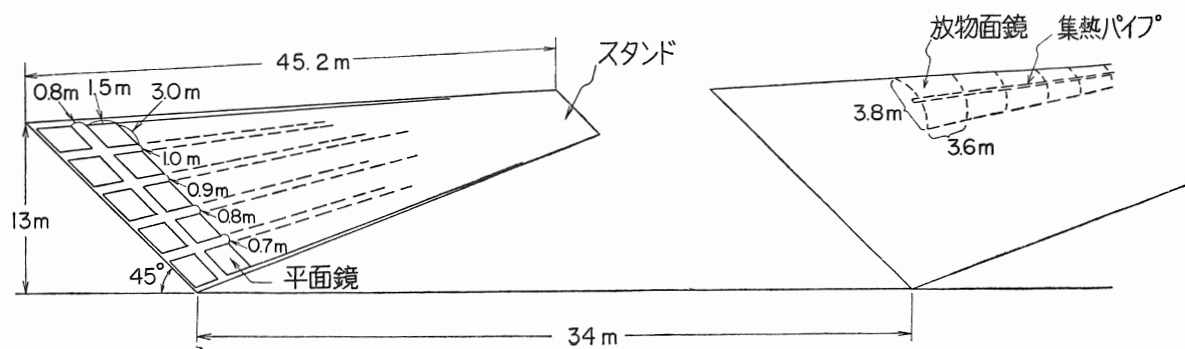


図1 集光系1ユニットの構成

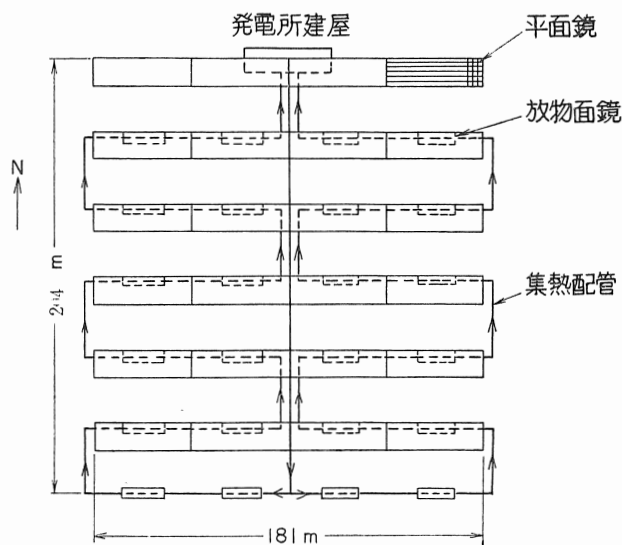


図2 1,000 kW太陽熱発電プラントのレイアウトの例

テ5段×ヨコ20個、計100個の平面鏡が設置されている。また、樋形の放物面鏡が前方(南側)のスタンドの裏側上端に、平面鏡の段の数(この設計では5)だけ設置されており、平面鏡で反射された太陽光は、各平面鏡の段ごとにひとつの放物面鏡に集められる。したがって、放物面鏡の軸は一樣に東西方向であるが、上下の向きは、それぞれの平面鏡の段にあわせて少しずつ異なる。また、放物面鏡の焦線距離は一樣に放物面鏡のタテの巾(開き度)の1/4とし、焦線上に集熱管を水平に設けてある。集熱管は、5個の放物面鏡を通して1本であり、放物面鏡のヨコ方向の長さの合計よりやや長くなっている。この中を作動流体である水一水蒸気が流れる。集熱管の表面は、太陽光を吸収しやすく熱放射が少ない選択面となっており、さらに集熱管の外周をガラス管でつつんである。

実際の発電プラントでは、図2に示すように、このようなスタンドが多数設置され、集光系で発生した水蒸気はタービンに運ばれる。

3. 集光量計算プログラムの構成

プログラム全体の概略を図3に示す。

この図にあるように、プログラムの計算内容は、大きくわけて、「集光系の形状計算」、「光学的計算」、および「集光量の計算」の3つのブロックからなる。以下プログラムの内容をブロックごとにやや詳しく述べる。

3.1 集光系の形状計算

このブロックの主な機能は、集光系の主要な構成を入力することにより、これ以後の計算に必要な集光系

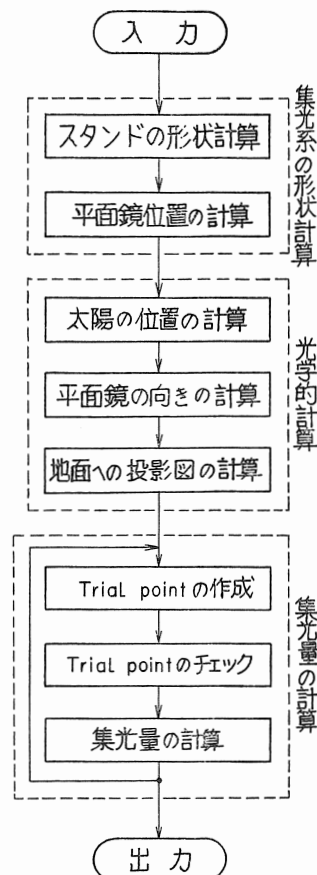


図3 プログラムの概略構成

の構成ないし寸法を求めることであり、「スタンドの形状計算」と「平面鏡位置の計算」の2つの計算処理よりなる。これらの計算式はごく簡単なものなので、ここでは主な入出力のみを示す。

(1) スタンドの形状計算

入力：平面鏡の段数，平面鏡の数/段数，平面鏡の長さ（タテ），平面鏡の幅（ヨコ），平面鏡タテ方向の中心間距離，平面鏡ヨコ方向の中心間距離，スタンド間の距離（南北），スタンドの傾き

出力：スタンドの長さ，スタンドの斜面の長さ，スタンドの高さ，スタンドの頂点の座標^{*}，前方のスタンドの頂点の座標^{*}

ここで^{*}印座標はスタンドの下端中央を原点とし南に x 軸，東に y 軸，上方に z 軸をとるものとする。

(2) 平面鏡位置の計算

入力：平面鏡の長さ，平面鏡の幅，平面鏡タテ方向の中心間距離，平面鏡横方向の中心間距離，スタンドの傾き，スタンドの頂点の座標

出力：平面鏡の中心点の座標，平面鏡の総面積

3.2 光学的計算

このブロックは以下の3つの計算処理からなる。

(1) 太陽の位置の計算

ここでは，指定された季節，時刻における太陽の方位角と高度（仰角）を求める。

入力：設置点の緯度^{*}，設置点の経度^{*}，「中央」標準時刻^{*}

これら^{*}印の入力データの代りに「太陽の方位角」と「太陽の仰角」を入力することができる。

出力：設置点での真の時刻，太陽の方位角，太陽の仰角，太陽光がスタンド表面にあたるか否かのチェック結果

主な計算式を以下に示す文献1)。

○設置点の真の時刻の計算

$$\theta_a = \frac{\varepsilon_2 - 135}{15} \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta_b = 0.006938 + \cos d(-0.134940 - 0.14434 \cos d + 0.021273 \cos^2 d) + \sin d(-0.030873 + 0.330601 \cos d + 0.002474 \cos^2 d) \dots\dots (2)$$

$$t = \frac{\pi}{12}(T - 12 + \theta_a + \theta_b) \dots\dots\dots (3)$$

$$t' = 12 + t \times \frac{12}{\pi} \dots\dots\dots (4)$$

ここで， θ_a ：設置点の経度に基づく時差

θ_b ：地球の自転速度の変化に基づく時差（均時差）

d ：春分を0とし，1年を 2π とする角度で示した季節（ $=0.017214 \times$ 春分からの経過日数）

t ：時角

t' ：設置点を基準とした時の時刻（太陽の南中時を12時とする）

○太陽の方位角の計算

$$\begin{aligned} \delta &= 0.000504 + \cos d(-0.008562 + 0.011635 \\ &\quad \cos d - 0.001172 \cos^2 d) + \sin d(0.408858 \\ &\quad + 0.001708 \cos d - 0.012879 \cos^2 d) \\ &\quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \delta \sin t}{-\sin \delta \cos \varepsilon_1' + \cos \delta \sin \varepsilon_1' \cos t} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで， δ ：太陽赤緯

α ：太陽の方位角（南中時を0，東側を負，西側を正とする）

ε_1' ：設置点の緯度

○太陽の仰角の計算

$$\beta = \sin^{-1}(\sin \varepsilon_1' \sin \delta + \cos \varepsilon_1' \cos \delta \cos t) \dots\dots\dots (7)$$

ここで， β ：太陽の仰角

(2) 平面鏡の向きの計算

平面鏡は，太陽光を放物面鏡に向って反射させるように動かされる。この際，平面鏡の中心点を中心とし，平面鏡の上下の辺は水平に保つように回転するものとする。

入力：太陽の方位角，太陽の仰角，平面鏡の中心点の座標（各平面鏡の段に対応する）放物面鏡の中心点の座標

出力：平面鏡からみた放物面鏡の方位角，平面鏡からみた放物面鏡の仰角，平面鏡と太陽がなす角，平面鏡の頂点の座標

(3) 地面への投影図の計算

このプログラムの特徴のひとつは，すべての構成物の（仮想的な）影を求め，その影の重なりによって平面鏡の影の割合を計算するという方法をとっている点である。こうすることにより，三次元空間の問題を二次元的にし，取扱いを簡単化している。

ここでは，平面鏡およびスタンドが地上につくる影の形を計算する。

入力：太陽の方位角，太陽の仰角，スタンドの頂点の座標，前方のスタンドの頂点の座標，平面

鏡の頂点の座標

出力：スタンドの頂点の地面への投影座標，前方のスタンドの頂点の地面への投影座標，平面鏡の頂点の地面への投影座標，スタンドの辺の地面への投影図の式，前方のスタンドの辺の地面への投影図の式，平面鏡の辺の地面への投影図の式

計算式自体は，いずれも簡単な代数式であるので省略する。

3.3 集光量の計算

このブロックは，「Trial Point の作成」，「Trial Point のチェック」，および「集光量の計算」の3つの計算処理からなる。このプログラムの最大の特徴は，平面鏡の蔭の割合および平面鏡で反射された太陽光が他の平面鏡によって遮られる割合をモンテカルロ法を使って計算する点にある。

(1) Trial Point の作成

ここでは，スタンド上の平面鏡各段の中から random に平面鏡を選び，さらにその平面鏡内の点（位置）を random に選ぶ。なお，平面鏡内の点を選ぶとき，地面にできた平面鏡の影の中で選ぶようにしている。(1)～(3)の計算処理は，乱数の発生回数（多いほど精度が良い）だけ繰返す。

入力：乱数の発生回数，平面鏡の頂点の地面への投影座標

出力：指定された平面鏡の番号，指定点の座標，以下に具体的方法を示す。

○平面鏡の指定

段ごとの平面鏡の数を J とすると， $1 \sim J$ （東側の平面鏡から番号をつける）の平面鏡の中から無作為に（乱数発生による）ひとつの平面鏡を抽出する。その平面鏡の番号を j とすると，この j は，各平面鏡の段に共通とする。すなわち，平面鏡の段数を I とすると，各段から1個ずつ，計 I 個の平面鏡が同時に抽出されたことになる（註1）。

○平面鏡内の位置の指定

上記のようにして指定された平面鏡（ I 個）内の位置（平面鏡の投影図は， $x-y$ 二次元空間内で平行四辺形となっている）を無作為に抽出する。乱数は I 個の平面鏡全体で1組発生させる（二次元の座標を決定するので2個）。

(2) Trial Point のチェック

(1)で指定された点が，他の平面鏡やスタンドの蔭になっていないかどうか，また平面鏡のその

点で反射した太陽光が隣接する平面鏡によって遮られないかどうかをチェックする。

入力：指定された平面鏡の番号，指定点の座標，前方のスタンドの辺の地面への投影図の式，平面鏡の辺の地面への投影図の式，平面鏡と太陽のなす角

出力：段ごとの平面鏡の有効利用率，指定点が蔭であるか，その点で反射した光が他の平面鏡で遮られた回数の割合

計算処理の具体的内容を以下に示す。

○スタンドの蔭か否かのチェック

該当する平面鏡の設置されているスタンド（スタンドの裏側に光が当たっている場合）あるいは前方のスタンドの蔭になっていないかどうかをチェックする。スタンドの影は平行四辺形であり，上記の指定点がある内部にある場合は蔭になっていると判定できる。

○周囲の平面鏡の蔭か否かのチェック

蔭をつくる可能性のある平面鏡としては，上下，左右および斜めに接する8個の平面鏡を考慮する。このうち，平面鏡の中心点が，指定点の平面鏡の中心点と比較して太陽からより離れている場合には対象外とする。平面鏡の投影図もそれぞれ平行四辺形であり，そのいずれかの内部にある場合は蔭に入っていると判定する。

○反射光が他の平面鏡に遮られるか否かのチェック

平面鏡が近接している場合，図4に示すように，平面鏡での反射光が他の平面鏡によって遮られる可能性がある。遮る可能性のある平面鏡としては，上下，左右，および斜めに隣接する8個のうち，中心点が，指定点のある平面鏡より放物面鏡に近いものを考える。

いま，指定された平面鏡を (i, j) ，その周囲の平面鏡を (m, n) ($m=i-1, i, i+1, n=j-1, j, j+1$) とすると，

$$L_c^{m,n} < L_c^{i,j} \dots \dots \dots (8)$$

ここで， $L_c^{i,j}$ ：平面鏡の (i, j) 中心点とそれに対応する放物面鏡の中心点との距離

$L_c^{m,n}$ ：平面鏡 (m, n) の中心点と上記の放物面鏡の中心点との距離

であり，かつ点 $(x_i^{mn'}, y_i^{mn'})$ が

(註1) 平面-曲面併用集光方式を対象としているのでこうしているが，大型のタワー方式などの場合は，平面鏡の段も無作為に抽出することにも良いであろう。

$$a_k^{m,n}x + b_k^{m,n}y + c_k^{m,n}z = 0 \quad k=1, \dots, 4 \quad (9)$$

ここで、 $(x_t^{m,n}, y_t^{m,n})$ は、以下の式で与えられるものである（図4参照）。

$$z_t = \frac{\tan \beta (x_0^{i,j} - x_t') \cos \alpha^{i,j} - (y_0^{i,j} - y_t') \sin \alpha^{i,j} + z_0^{i,j} \tan \beta^{i,j}}{\cos(\alpha - \alpha^{i,j}) + \tan \beta \tan \beta^{i,j}} \quad (10)$$

$$y_t = y_t' - z_t \cdot \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \quad (11)$$

$$x_t = x_t' + z_t \cdot \frac{\cos \alpha}{\tan \beta} \quad (12)$$

$$z_t^{m,n} = z_t + \frac{\tan \mu^{i,j} \{ (x_0^{m,n} - x_t) \cos \alpha^{m,n} - (y_0^{m,n} - y_t) \sin \alpha^{m,n} + (z_0^{m,n} - z_t) \tan \beta^{m,n} \}}{\cos(\eta^{i,j} - \alpha^{m,n}) + \tan \mu^{i,j} \tan \beta^{m,n}} \quad (13)$$

$$y_t^{m,n} = y_t - \frac{\sin \eta^{i,j}}{\tan \mu^{i,j}} (z_t^{m,n} - z_t) \quad (14)$$

$$x_t^{m,n} = x_t + \frac{\cos \eta^{i,j}}{\tan \mu^{i,j}} (z_t^{m,n} - z_t) \quad (15)$$

$$y_t^{m,n'} = y_t^{m,n} + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} z_t^{m,n} \quad (16)$$

$$x_t^{m,n'} = x_t^{m,n} - \frac{\cos \alpha}{\tan \beta} z_t^{m,n} \quad (17)$$

ただし、式(9)は平面鏡(m,n)の辺の地面への投影図の式をあらわす。

(x_t', y_t') : 指定された点の座標

(x_t, y_t, z_t) : 上記の点の平面鏡上の実際の点の座標

$(x_t^{m,n}, y_t^{m,n}, z_t^{m,n})$: 上記の点から放物面鏡に向う太陽光が、平面鏡(m,n)を含む平面にあたる点の座標

$(x_t^{m,n'}, y_t^{m,n'})$: 上記の点を地面に投影した点の座標

$(x_0^{i,j}, y_0^{i,j}, z_0^{i,j})$: 平面鏡(i,j)の中心点の座標

$\alpha^{i,j}, \beta^{i,j}$: 平面鏡(i,j)の法線の方位角と仰角

$\eta^{i,j}, \mu^{i,j}$: 平面鏡(i,j)からみた放物面鏡の方向の方位角と仰角

○ 段ごとの平面鏡の有効利用率

$$e_t^{i,j} = \cos \theta^{i,j} \quad (19)$$

ただし、太陽光が遮られるときは $e_t^{i,j} = 0$ 。

$$E_i' = \sum_{j=1}^T \frac{e_t^{i,j}}{T} \quad (i \text{ ごとに積算}) \quad (20)$$

ここで、 $e_t^{i,j}$: 指定点の相対的日射量

$\theta^{i,j}$: 指定された平面鏡の法線が太陽光となす角

E_i' : 段 i の平面鏡の有効利用率

T: 乱数の発生回数

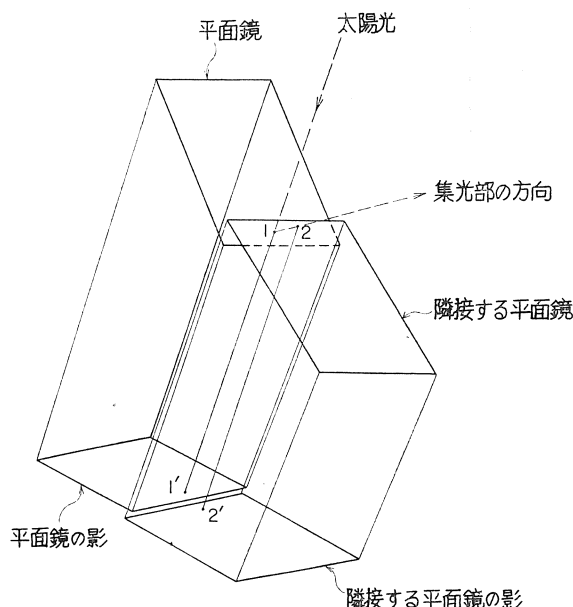
(3) 集光量の計算

ここでは、平面鏡の段ごとおよび集光系全体の集光量を計算する。

入力: 直達日射量、段ごとの平面鏡の有効利用率
太陽の仰角、平面鏡の総面積、スタンドの長さ
スタンド間の距離

出力: 段ごとの集光量、集光系（スタンド1基分）全体の集光量、集光系全体の平面鏡の有効利用率、敷地全体の集光効率(註2)。

計算式は簡単なので省略する。



- 1: 反射点 (x_t, y_t, z_t)
- 1': 反射点を地面へ投影した点 (x_t', y_t')
- 2: 反射した光を遮る点 $(x_t^{m,n}, y_t^{m,n}, z_t^{m,n})$
- 2': 上記の点を地面へ投影した点 $(x_t^{m,n'}, y_t^{m,n'})$

図4 反射した光が隣接した平面鏡に遮られる例

(註2) 敷地全体の受光量に対する平面鏡での集光量の割合

4. 計算精度の評価

本プログラムでは、モンテカルロ法を使っているの
で、その精度について検討する。

本プログラムで、平面鏡の蔭の割合および反射した
太陽光が遮ぎられる割合の計算に用いているモンテカ
ルロ法は、もっとも基礎的な“あたりはずれのモンテ
カルロ” (hit-or-miss Monte Carlo) と呼ばれるもの
である。

いま、平面鏡の蔭になる割合（あるいは遮ぎられる
割合）を I とすると、このモンテカルロ法によって得
られる計算値 I' の分散 (variance) は、

$$\text{var } I' = \frac{I - I'^2}{N} \dots \dots \dots (21)$$

となる。ここで N は Trial の回数である。したがっ
て、 I' の標準偏差 E は、

$$E = \sqrt{\text{var } I'} = \sqrt{\frac{I - I'^2}{N}} \dots \dots \dots (22)$$

となり、同一の N に対して標準偏差が最大になるの
は、 $I=0.5$ のときで

$$E_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{N}} \dots \dots \dots (23)$$

となる。

現在の設計段階では、設計で最終的に必要な集熱量
あるいは発電量の計算において、他の設計データから
の誤差が合計で10%近くはあると推定されるので、平
面鏡による集光量の計算精度のみをそれほど上げて
意味はない。1%以下の誤差であれば十分であろう。
それぞれ太陽光となす角度が異なる複数個の平面鏡に

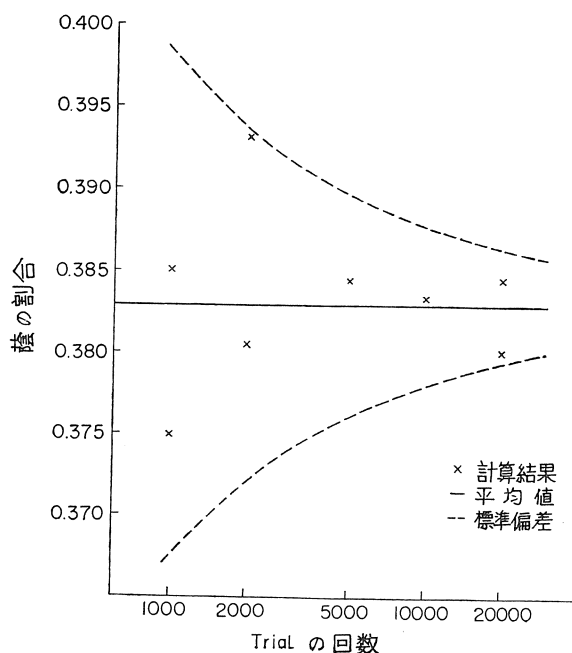


図5 3段目の平面鏡の蔭の割合

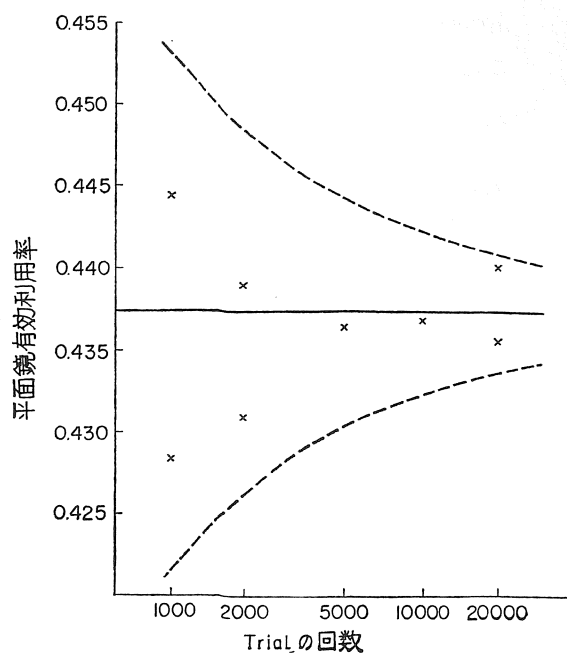


図6 3段目の平面鏡の有効利用率

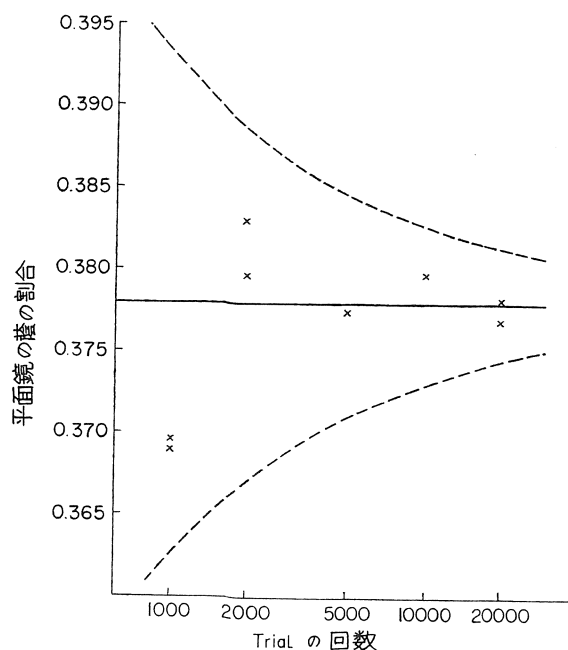


図7 スタンド全体の平面鏡の蔭の割合

による集光量の計算値の精度は、蔭の割合（あるいは遮
ぎられる割合）の精度とは若干異なるが、近似的に等
しいと考えて良いであろう。したがって、式 (23) で
与えられるように、標準偏差 (σ) を 1% とするには
 N を 2,500 とすればよく、 2σ 程度の信頼度で議論
するにはその 2 倍、5,000 とすればよい。

確認のために、図1の設計例について計算した結果
を図5～8に示す。ここで、設置点は北緯 36.6 度、
季節は夏至、時刻は設置点の時刻で朝 8 時（南中時を
12 時として）としてある。乱数は、それぞれの計算で
重複しないようにとってある。

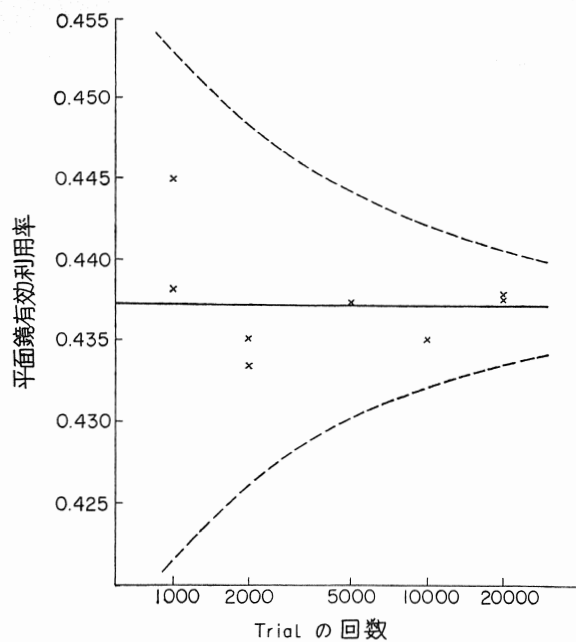


図 8 スタンド全体の平面鏡の有効利用率

図 5 は、スタンドの中央の段の平面鏡の蔭の割合について計算したものである。平均値はすべての計算結果に Trial の回数のウェイトをつけて平均したもので、Trial 61,000 回の平均値と考えてよい。標準偏差は式 (22) により求めたものである。このケースの場合、原理的に式 (22) が成立するはずである。

図 6 は、同じ平面鏡群における平面鏡有効利用率を示したものである。

同様に、図 7 および 8 は、それぞれ スタンド全体の平面鏡の蔭の割合と有効利用率を示したものである。このプログラムでは、1 回の Trial で全段（この設計例では 5 段）の平面鏡の横方向の番号と平面鏡内の点の指定が同時になされるため、Trial の回数に対する計算精度はやや良くなる傾向にあると考えてよい。ただし、各段についての指定が独立でないため、5 倍の Trial の回数に匹敵する精度は期待できない(註 3)。

いずれにせよ、これらの結果から分かるように、計算精度は、ひかえめにみて式 (22) で与えられると考えてよいであろう。

なお、計算所要時間は、Trial 10,000 回の場合でも IBM370-158 で 30~40 秒程度である。

5. 結 言

太陽熱発電プラントの集光系の平面鏡による集光量を計算するプログラム SECH-I の構成と、その精度について述べた。

太陽光は平面鏡に入射する段階と、平面鏡で反射して集光部へ向う途中で隣接する平面鏡その他によって遮られる可能性があり、計算が複雑になりがちであるが、このプログラムではモンテカルロ法を適用することにより計算課程を比較的簡単にする 것이できた。また設計に必要な精度を得るための計算所要時間も許容できる程度になっている。

このプログラムを使って集光系の集光特性について検討した結果については次報で示す予定である。

最後に、本研究を進めるに当たり、終始ご指導を頂いた日立製作所原子力研究所谷口薫所長、土井彰主管研究員、隅田勲主任研究員、日立研究所第 10 部大島亮一郎部長、植西晃主管研究員、およびプログラムの作成に協力を頂いた日立製作所原子力研究所三木一克研究員その他の方々に感謝します。

なお、本研究は工業技術院のサンシャイン計画委託研究の一環として行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 野口哲男(監修): 太陽エネルギー利用技術: フジ・テクノシステム (昭 49 年 2 月)

(註 3) 平面鏡の段数が多く、かつ集光系全体あるいはスタンド全体の特性を求めたい場合には、平面鏡の段も選択的に求めるようにした方が、少ない計算量で高い精度が得られる。