

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	集光太陽熱用集光シミュレータの開発
著者(和文)	宇多村 元昭, 玉浦 裕, 湯浅 実, 山本 敬, 葉山 幸男, 梶田 梨奈 (以上 (株) ソーラハイテック), 蓮池 宏 (エネ総工研)
出典(和文)	太陽/風力エネルギー講演論文集B7-72, , , pp. 341 - 344
発行日	2006, 10

集光太陽熱用集光シミュレータの開発

会員 ○ 宇多村元昭（東京工業大学）
 湯浅 実（（株）ソーラハイテック）
 葉山幸男（（株）ソーラハイテック）
 会員 蓮池 宏（（財）エネルギー総合工学研究所）

会員 玉浦 裕（東京工業大学）
 山本 敬（（株）ソーラハイテック）
 梶田梨奈（（株）ソーラハイテック）

Development of Optical Simulator for Solar Thermal Concentrating System.

Motoaki UTAMURA*, Yutaka TAMAURA*,
 Minoru YUASA**, Takashi YAMAMOTO**,
 Yukio HAYAMA**, Rina KAJITA**
 and Hiroshi HASUIKE***

* Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, JAPAN

Fax: +81-3-5734-2959, E-mail: utamura@rccre.titech.ac.jp

** Solar Hytech Inc.

*** The Institute of Applied Energy

ABSTRACT

Optical simulator is developed for beam down solar concentration system with a tower. Various optical losses are taken into consideration in computation with high accuracy. Given latitude on the earth and time, the simulator calculates instant power and annual cumulative energy received. By combining ray tracing method with Monte Carlo method, efficient calculation is realized applicable to a large scale problem of practical size. Application of the simulator to 25MW class beam down concentrating solar tower system is shown and its validity is confirmed.

キーワード：ヘリオスタット、ビームダウン

Keywords: Heliostat, Beam Down

1. はじめに

太陽エネルギー利用技術の中でも最も高効率であり、高出力であることが期待されている太陽熱発電プラント

の一つとして、ヘリオスタットを用いるタワー集光系がある。また、通常のタワー集光系をさらに発展させたものとして、中央反射鏡を用いるビームダウン集光系も開発されている。これらの方式の集光系は、最小のプラントコストで最大の出力を得るために、厳密な集光計算とその計算を基にした設計及びコスト計算を行うことが必要となる。そこで、ビームダウン集光系の集光計算を行うシミュレータを開発した。

2. ビームダウン式集光系

通常のタワー集光系は、タワー頭頂部でヘリオスタット群によって反射される太陽光を集熱する。これに対し Fig. 1 に示すようにビームダウン式集光系はヘリオスタットの集光ターゲット付近に中央反射鏡 (Central Reflector) を設置することによって、タワー頭頂部での集光方式の場合よりも低い位置で集熱するシステムである¹⁾。

ビームダウン式集光系は集熱部が低く位置しているため頑強なタワーを建造する必要がない。集熱部で熱回収する熱媒を送液するポンプもより低出力のもので十分である。さらに、広範囲のヘリオスタットで反射された太陽光を1つの平面に集約することによって、より高倍率の集光が可能となり、それに伴って熱媒の熱交換効率が向上することが期待されている。

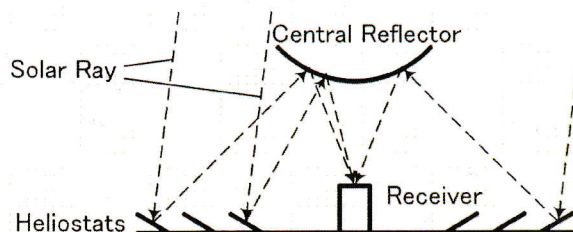


Fig. 1: Beam Down System.

3. 光学

ビームダウン式集光システムの集光計算を行う上で本シミュレータは次の要素を考慮できる。

3. 1 太陽の光強度分布

太陽は視直径が約 0.533 (deg) であるためその大きさを無視することはできない。さらに、太陽の光強度分布は中心部が高く周辺部は低くなっている。Jose のモデル²⁾によると太陽の中心からの視野角 ε における強度 I は太陽定数を C 、太陽の視半径を R とすると、

$$I = \left(\frac{C}{\pi R^2 A + \frac{2}{3} B} \right) \left(A + B \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2}{R^2}} \right) \quad (1)$$

となる。ここで A 、 B は Jose の定数で、

$$\begin{cases} A = 0.39 \\ B = 0.61 \end{cases}$$

である。

3. 2 大気による光の減衰

太陽から来た光は地球の大気の影響により地上に届くまでに減衰する。Kreider & Kreith³⁾によると一般に大気の透過率 τ_{atm} は、3% の誤差をもって次式で示される。

$$\tau_{atm} = 0.5 \left(e^{-0.65m(z, \alpha)} + e^{-0.095m(z, \alpha)} \right) \quad (2)$$

ここで α は太陽高度で、海拔 z におけるエアマス m は次式で与えられる。

$$m(z, \alpha) = m(0, \alpha) \frac{p(z)}{p(0)} \quad (3)$$

ここで P は大気圧で、海拔 0 におけるエアマス $m(0, \alpha)$ は次式で与えられる。

$$m(0, \alpha) = \sqrt{1,229 + (614 \sin \alpha)^2} - 614 \sin \alpha \quad (4)$$

3. 3 シャドウイング・ブロッッキング

ヘリオスタットが複数存在するとき、それらは互いにシャドウイングおよびブロッッキングといった干渉をおこして集光量を減少させることがある。

シャドウイング及びブロッッキングのイメージを Fig. 2 に示す。

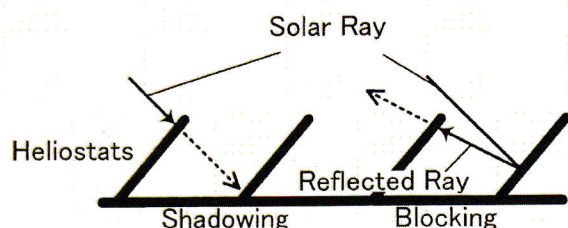


Fig. 2: Shadowing and Blocking.

シャドウイングはヘリオスタットの一部分が別のヘリオスタットの影に入ってしまう現象で、ブロッッキングはヘリオスタットで反射された光が焦点へと向かう過程で別のヘリオスタットによって遮断されてしまう現象である。

3. 4 中央反射鏡のシャドウイング

ビームダウン式集光システムにおいてはヘリオスタットが中央反射鏡の影に入ってしまうことがある。ヘリオスタットは太陽光を受けることができなくなってしまうので、集光量が減少してしまう。

本シミュレータはこの事象についても厳密に計算することができる。

3. 5 ヘリオスタットの追尾誤差

ヘリオスタットは焦点方向と太陽方向のちょうど中間の方向を向いていることが理想であるが、現実には加工精度や据付誤差に起因する機械精度や追尾誤差など制御の精度、太陽方向の計算精度の影響により誤差を生じる。

本シミュレータは、上記の事象を正規分布に従う統計量として光線追跡法の計算に考慮している。

3. 6 鏡面のゆらぎ

鏡面は完全な平面、もしくは理想的な曲面であることが望ましいが、現実には鏡の加工精度あるいは熱の影響により局所的な歪みを生じる。

本シミュレータは、上記の事象を正規分布に従う統計量として光線追跡法の計算に考慮している。

4. 集光計算

本シミュレータは集光計算において光線追跡法を採用している。しかし、通常の光線追跡法を用いるとヘリオスタット数が千台を超えるようなプラントにおいては計算量が膨大になるため計算には数時間～数十時間必要であった。そこで、本シミュレータはモンテカルロ法を用いることによって計算時間を短縮した。

4. 1 光線追跡法

太陽表面上の任意の点から出て、ヘリオスタット上の任意の点に向かう光について、ヘリオスタットおよび中央反射鏡で反射されレシーバに到達するまでの軌跡を追跡する。これを太陽表面上のすべての点とヘリオスタット上のすべての点において計算することによってレシーバでの集光強度分布を求める方法である。

4. 2 モンテカルロ法

非常に複雑な系や、多大な計算量を必要とする系において、マクロ的な現象を多数の素過程に分割し、乱数を用いて計算を行うことによって、計算時間の短縮を行う方法である^{4) 5)}。

本シミュレータにおいては光線追跡法において太陽表面上の任意の点とヘリオスタット上の任意の点を選ぶ際

に乱数を用いて計算を行った。この方法により全ての点を計算する従来の方法よりも計算量が格段に減少し、より少ない光線追跡の回数で十分な精度を得ることができた。

5. 計算例

計算例として 25MWt 級のビームダウン式集光系の設計および集光計算を行った。

5. 1 計算条件

主な計算条件を Table 1 にまとめる。

Table 1: Input Parameter.

Parameter	Value	Unit
Latitude	37.0	deg
Time	<i>variable</i>	
Upper Focus Height	61.9	m
Lower Focus Height	15.5	m
Solar Constant	1.36	kW/m ²
Solar Apparent Radius	0.0046542	rad
Heliostat Reflectivity	0.900	
Heliostat Optical Error	0.0430	deg
Heliostat Set Error	0.0733	deg
Heliostat Number	<i>variable</i>	
Heliostat Height	3.00	m
Facet Vertical Length	0.970	m
Facet Sideway Length	0.970	m
Facet Vertical Number	5	
Facet Sideway Number	7	
Facet Vertical Distance	0.0125	m
Facet Sideway Distance	0.0350	m
Central Reflector Height	45.6	m
Central Reflector Reflectivity	0.900	
Receiver Inlet Radius	2.00	m

5. 2 計算

計算は以下の流れで行われる。

1) ヘリオスタット配置の決定

ヘリオスタット群を年間集光エネルギーが最大となるように配置する。

2) 中央反射鏡の設計

中央反射鏡の最適形状を計算し、配置する。

3) モンテカルロ光線追跡法による集光計算

計算はある瞬間のパワー(Wt)しか得ることができないため、1年間の合計値を得るために、1年間のうち約 30 日間隔で 12 日間を選択し、各 1 日を 1 時間おきに集光計算した。その後、すべての計算結果を合計し、さらにその値を 30 倍して 1 年間のエネルギー積算値 (Wht) とした。

4) データ出力

計算結果をまとめてファイル出力する。

5. 3 計算結果

計算の結果得られたプラント性能を Table 2 に示す。必要なヘリオスタット数は 1401 台でレシーバの最大入力パワーは 24.3MWt であった。

計算によって設計されたプラントの 3 月 20 日 12 時 00 分におけるイメージを Fig. 3 に示す。年間エネルギーを最大にするヘリオスタットフィールド形状は、東西方向に広がり中心がタワーの北側にある楕円形に近い。南北、東西両端間の距離は、それぞれ 456(m)、512(m) であった。

計算によって得られた 3 月 20 日 12 時におけるレシーバの集光分布を Fig. 4 に示す。

Table 2: Plant Speck.

Parameter	Value	Unit
Heliostat Number	1401	
Heliostat Field Length (South North)	456	m
Heliostat Field Length (East West)	512	m
Central Reflector Length (South North)	79	m
Central Reflector Length (East West)	83	m
Maximum Receiver incident Power (6/21 12:00)	24.3	MWt
Annual Receiver incident Energy	61,292	MWht
Annual Heliostat Shadowing Energy	3,178	MWht
Annual Heliostat Blocking Energy	939	MWht
Annual Central Reflector Shadowing Energy	3,595	MWht

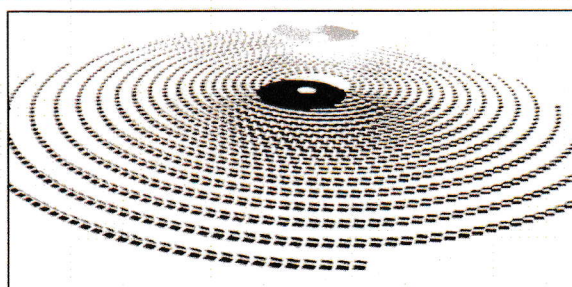


Fig. 3: Plant Panorama.

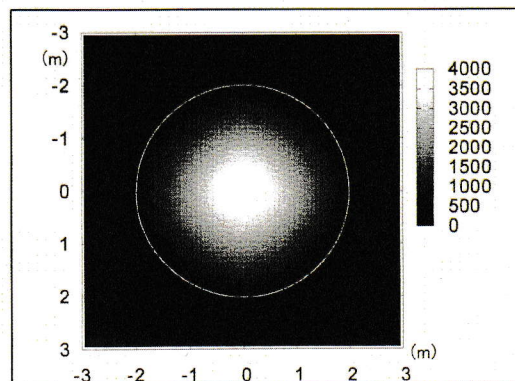


Fig. 4: Receiver Flux.

6. 検証

6.1 モンテカルロ法の検証

本シミュレータの計算が妥当なものであるかどうかを検証するために次の手順で検証を行った。まず、シミュレータの計算により出力された値のうち、ヘリオスタットで反射されたパワー(*Helio-stat Power*)、ヘリオスタットのシャドウイングパワー(*Helio-stat Shadowing*)および中央反射鏡のシャドウイングパワー(*Central Reflector Shadowing*)の値を合計した値(*Total Power*)を求めた。次に各ヘリオスタットについて、法線ベクトル、太陽の方向ベクトルのなす角とヘリオスタットの鏡面積から有効面積を求め、その合計値と日射強度から計算される値(*Calc Power*)を求めた。シミュレータの計算の精度は(5)式で定義される *Total Power* と *Calc Power* とを比(*Validation*)によって表すことができ、精度が高ければこの値は1となる。

$$Validation = \frac{TotalPower}{CalcPower} \quad (5)$$

モンテカルロ光線追跡法は光線追跡の回数が少ないと計算精度が十分に得ることができない。そこで、光線追跡の実行回数 100 回から 1 千万回の間で各 5 回ずつ計算し、それぞれの計算において集熱部における出力(*Receiver Power*)と *Validation* を算出した。なお、計算条件は Table 1 と同様であるが、時間は 3 月 20 日午前 9 時における瞬間値の計算のみを行った。以上の検証結果を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 から、*Validation*、*Receiver Power* のどちらも光線追跡の回数が増えるに従ってそれぞれ収束していくことが見て取れる。*Validation* の値は実行回数が増えるに従って 1 に収束していることから本シミュレータの光線追跡においてシャドウイングやブロッキングを計算する際のダブルカウントや欠損がないことが示された。

また、実行回数 10 万回の計算において *Receiver Power* の変動係数は 0.59% であった。

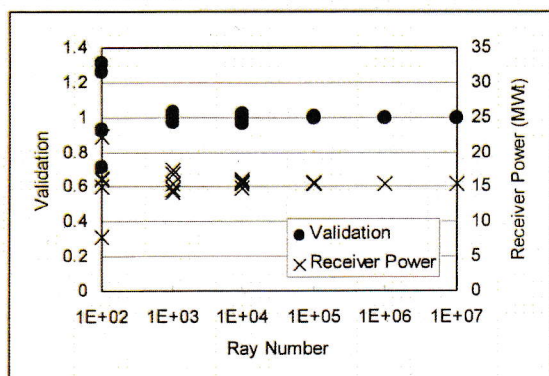


Fig. 5: Validation of Monte Carlo method.

6.2 計算時間

Table 1 の条件と、3 月 20 日午前 9 時における瞬間値の計算時間を光線追尾の回数を 100 回から 1 千万回の間で調べた。また年間集光エネルギー量の算出を求める際に行った光線追尾回数 10 万回の計算を 134 回行う計算の計算時間を調べた。結果を Table 3 に示す。なお、計算に用いた PC のスペックは CPU : Pentium 4 3.00GHz、RAM : 2.00GB であった。

Table 3: Calculation Time.

Calculation Condition	Ray Number	Calculation Time
Instant Power	1E+02	29 (sec)
Instant Power	1E+04	30 (sec)
Instant Power	1E+06	37 (sec)
Instant Power	1E+08	674 (sec)
Annual Cumulative Energy (134 calculation)	1E+06	3539 (sec)

7. まとめ

ヘリオスタットを用いるタワー集光系を対象とした集光シミュレータを開発し、25MWt プラントの光学系を試設計した。

ビームダウン式集光系は通常のタワー集光系の場合よりも複雑な計算が必要になるが、本シミュレータは各種光学エラーを考慮することができ、且つ計算時間も十分実用の範囲内であった。

今後は本シミュレータをさらに発展させビームダウン式集光系の集熱部の設計およびプラントのコスト計算などの機能を追加し、システムの最適設計を行っていく予定である。なお、本シミュレータには汎用性があり、方式が異なる他の集光系やソーラーコレクターにも適用可能である。

参考文献

- 鈴木研夫, 湯浅実, 玉浦裕, “水平置きヘリオスタットを用いたビームダウン式タワー集光系の最適設計”, 太陽エネルギー, 29[5] (2003), 41-47.
- Jose, P.D., “The flux through the focal spot of a solar furnace”, Solar Energy, 1(1957), 19-22.
- Kreider, J. F., Kreith, F., “Solar heating and cooling: Engineering, practical design, and economics”, Scripta Book Company (1975)
- 井上孝太郎, 坂本健, “平面鏡群による集光量の計算法について”, 太陽エネルギー, 4[1] (1978), 7-13
- 谷口博, Wen-Jei Yang, 工藤一彦, 黒田明彦, 持田 明野, “パソコン活用のモンテカルロ法による放射伝熱解析”, コロナ社 (1994)