

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	タワー型集光系におけるヘリオスタット群の最適配置
著者(和文)	宇多村 元昭, 玉浦 裕 (以上東工大), 湯浅 実, 梶田 梨奈 (以上 (株) ソーラハイテック)
出典(和文)	第23回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
発行日	2007, 1

タワー型集光系におけるヘリオスタット群の最適配置

Optimal Heliostat Layout for Concentrating Solar Tower Systems

宇多村 元昭 *・玉浦 裕 *・湯浅 実 **・梶田 梨奈 **

Motoaki Utamura

Yutaka Tamaura

Minoru Yuasa

Rina Kajita

A methodology to give an optimal layout of a group of heliostats has been developed for concentrating solar tower systems. Given the maximum solar power together with optical parameters, the method determines an optimal configuration of a heliostat field around a tower where reflected beams are focused and a resultant annual solar energy collected. Various optical losses such as cosine factor, and an optical interference such as shadowing and blocking are taken into account in the calculation. Furthermore, spillage is considered due to dilution of light at a receiver collector that is derived from effects of a finite solar disk and various errors inherent in optical hardware and control. It is found the spillage becomes significant at heliostats located in a distance from the tower farther than four times of tower height and dominates the configuration of the optimal heliostat layout.

1. 緒言

現在、集光太陽熱を用いるメガワット級の太陽熱発電としては SEGS 型 (parabolic trough system) が米国カリフォルニア州のモハビ砂漠で商業化されているが、これよりも集光度の高いタワー集光型が発電効率とコスト的に優れ、その実用化が推進されている。タワー集光型では、熔融塩レシーバを用いて太陽熱を熔融塩に蓄熱することにより、24 時間の熱発電を可能にしている。これまでに商用化されたタワー集光型としては、米国の DOE とボーイング社により開発された Solar One, Two があり、120MWt の Solar Tres がスペインで建設を控えている。

これらのタワー集光型がタワートップにビームを集光するのに対してタワートップに反射鏡 (中央反射鏡) を置いて集光ビームを地上で回収するビームダウン型集光系の開発が進められている (図 1)。ビームダウン型集光システムでは、熔融塩レシーバなどの重量物を地上に設置できるため、発電設備の大規模化に有利であり、また集熱効率の高いキャビティ型レシーバ^{2),3)}の採用が可能となり、発電コストの低減が期待される。しかしアイデア実現には、新たに中央反射鏡を付加した集光系の光学系技術の開発^{4),5)}や中央反射鏡の耐風圧設計などの課題を解決する必要があり、そのアイデアが提案されている (東工大 PCT 出願)⁶⁾。

タワー集光熱発電ではヘリオスタットが、設備コストの約 50% を占める。このため、過去にヘリオスタットの最適配置に関する研究がなされてきた⁷⁾。しかし、タワートップ

に比べて光学系が複雑かつ光路が長いビームダウンシステムに適用可能な手法は未開発である。本研究では、ビームダウン集光系を対象にした、ヘリオスタット群の最適レイアウト手法を開発し、ヘリオスタットの配置に及ぼす光学パラメータの影響の解明を試みた。

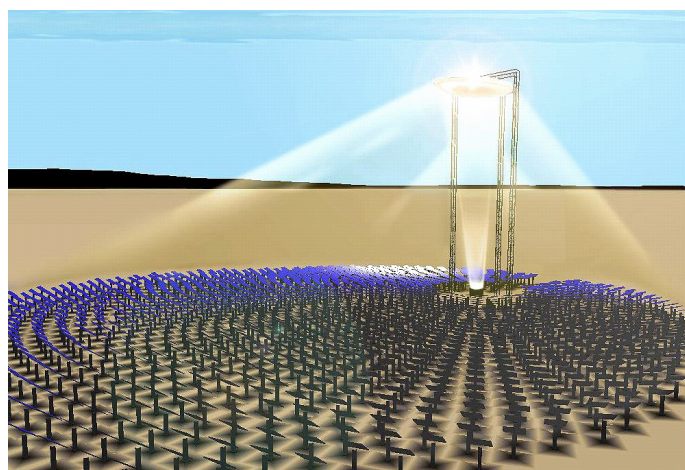


図 1 ビームダウン集光システムの概念図¹⁾

2. ヘリオスタットの最適配置問題と影響因子

(1) 最適配置問題

ビームダウン集光システムでは、地表に配した太陽を追

*東京工業大学炭素循環エネルギー研究センター

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-1-2

** (株) ソーラハイテック

〒222-0033 横浜市港北区新横浜 3-1-8

尾する反射鏡（ヘリオスタット）で太陽からの直達日光を中央反射鏡の上方焦点に向けて反射し（一次反射）、中央反射鏡で下方焦点に向けて光路を曲げ（二次反射）、地表レベルに設置したレシーバで受光し熱として回収する。この部分を光学系と称する。ヘリオスタット一枚当りの受光量は、北半球の場合タワーの北側で多いが、隣接鏡との光の干渉（陰と反射光の遮り）も顕著である。これらを考慮して、最小枚数で所要のエネルギーを回収するようヘリオスタットを最適配置する問題を考える。

（２）影響因子

レシーバでの受光量を支配する要因には、(i)ヘリオスタットの実効鏡面積の減少と(ii)光束拡散による光の漏れがある。前者(i)の要因には、①ヘリオスタットの正対位置からの傾き（コサイン効果）と②ヘリオスタットの陰と反射光の遮り（S & B）があり、後者(ii)には③太陽視直径、ヘリオスタットの平面性、④鏡面の歪みや据付け誤差などの機器公差や太陽追尾の制御遅れなどの影響がある。ここでは、まず、光学ロスの要因(i)のみを考慮してヘリオスタットを最適配置し、次いで要因(ii)も考慮に入れた配置の最適化を行い、影響因子(i)(ii)を分離評価する。

３．光束拡散無しの場合の最適レイアウト

３．１ 所要フィールド面積（理論下限値）

ヘリオスタットの大きさを特定しない連続体モデルにより、S & Bを避けた理想フィールド形状とヘリオスタットの所要鏡面積を求める。

（１）集光密度

太陽光の直達出力 DNI (Direct normal insolation) で規格化したヘリオスタット単位面積あたりの受光出力 s は $s = e_1 \cdot n = e_2 \cdot n$ であり、ヘリオスタットの陰の長さとしてブロッキング長さは、それぞれ $SL = s / e_{1z}$ 、 $BL = s / e_{2z}$ である。ここで、 e_1 、 e_2 、 n はそれぞれ、太陽の指向、タワー上方焦点の指向、ヘリオスタットの外向き法線を表す単位ベクトルである。陰とブロッキングを避けて配置可能なヘリオスタットの数密度の理論上限 $\bar{m}$ は $1/\max(SL, BL)$ なので、フィールド単位面積あたりの集光量 $\rho = s \bar{m}$ は、 $\min(e_{1z}, e_{2z})$

と表せる。すなわち、

$$\rho = \min(e_{1z}, e_{2z}) \quad (1)$$

この関数は動径と時刻の関数であり、したがって、集光密度 ρ は瞬間出力であれ年間エネルギーであれ、その分布はタワーを中心として点対称である。

（２）年間受光量

年平均の数密度 $\bar{m}$ を求める際、 m を日射量で重み付けする。

$$\bar{m} = \frac{\sum (m \times \tau_{atm} \times s)}{\sum (\tau_{atm} \times s)} \quad (2)$$

ここで、 τ_{atm} は、大気圏による直達光の減衰率で、太陽高度の関数、総和は一年にわたる時間積分の近似を示す。これを用いると、格子点 (i, j) でのヘリオスタット一枚当たりの受光エネルギーは

$$A_{ij} = \int \rho dt / \bar{m} \quad (3)$$

A_{ij} は、ヘリオスタットが常時太陽に正対している場合の年間受光エネルギーに対する比を表す。

図2は北緯37度、上方焦点高さ62mでの A_{ij} の等高線を示す。縦軸上が北、軸（フィールド長さ）の単位はmである。タワー位置（座標原点）の北側に最大値が現われる。最大値は0.944である。これより、与えられた年間エネルギーを得る最小フィールド面積が求まる。

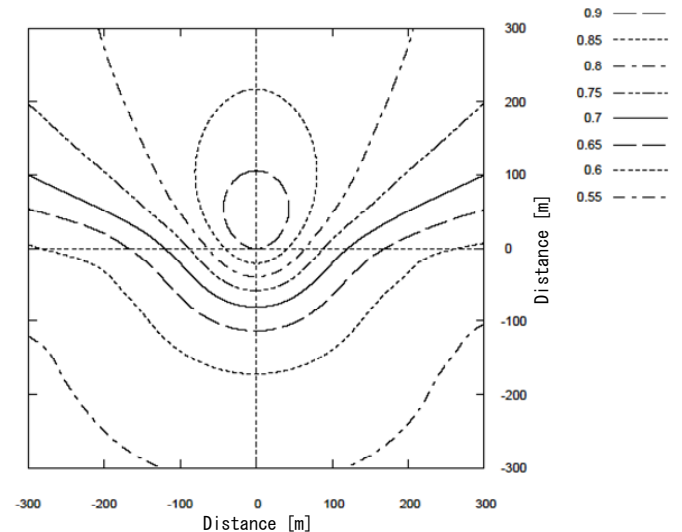


図2 ヘリオスタットあたり集光エネルギーのフィールド内分布

図3は、夏至南中時に最小フィールド面積で出力20MWを得る理論上のヘリオスタットフィールドを、同一出力の地面照射領域と比較して示す。ヘリオスタットフィールド面積の相対的増大分は光の遮り効果に起因する。

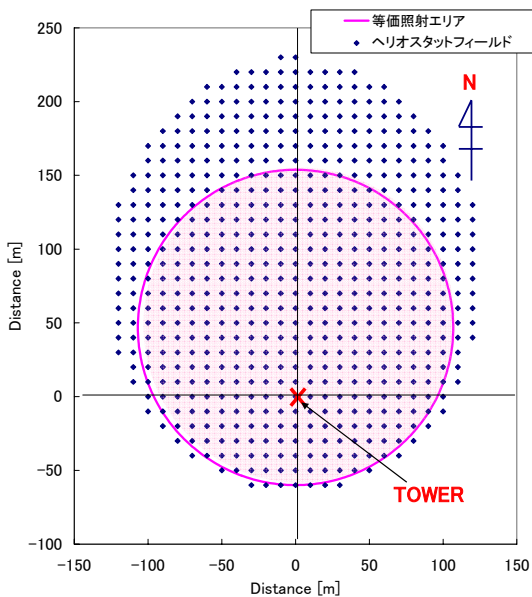


図3 ヘリオスタットフィールド形状
(北緯37度夏至南中時出力20MWの場合)

3. 2ヘリオスタット配置

ヘリオスタットの寸法を与え、個々のヘリオスタットを配置するアルゴリズムは以下の通り。タワーを中心とする多数の同心円上にヘリオスタットの座席を用意する。同心円の半径の増分 L_r と円周方向の間隔 L_{phi} は、陰とブロッキング長さを動径方向と円周方向成分に分解し、相隣るヘリオスタットが光学的、機械的に相互干渉しないように決定する。この円周上座標での物理量は、正方格子点から内挿する。ヘリオスタット用の座席を指定された出力が得られるまで A_{ij} の大きいものから順次選択する(実際配置)。

図4はこの手法での20MWの最適レイアウトを示す。ヘリオスタットの寸法は、縦4.9m 横6.8mである。実際配置は理想ヘリオスタットフィールド形状と比べて北側に伸び、広い面積が必要になっている。この理由は、理想配置が仮想的に無限小のヘリオスタットを考えた(連続体モデル)のに対し、実際配置ではそれが有限であるために、未活用のスペースが発生していることによる。この結

果受光面積が不足し、一枚当たりの受光量が多い北側のヘリオスタットが優先選択された結果、ヘリオスタットフィールドが北側に伸長したものである。理想配置でのヘリオスタットの等価枚数は696であるが、実際配置では1456となった。

図5は、光学系を設置する緯度がレイアウトに及ぼす影響を見たものである。この範囲では、緯度の影響は少ない。

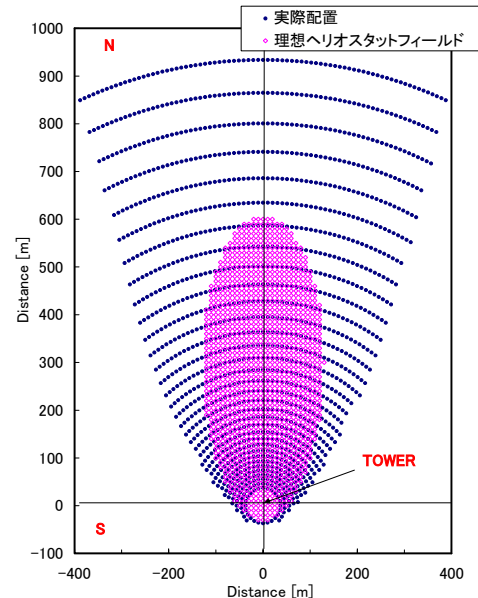


図4 光束拡散無しでのヘリオスタットの最適配置

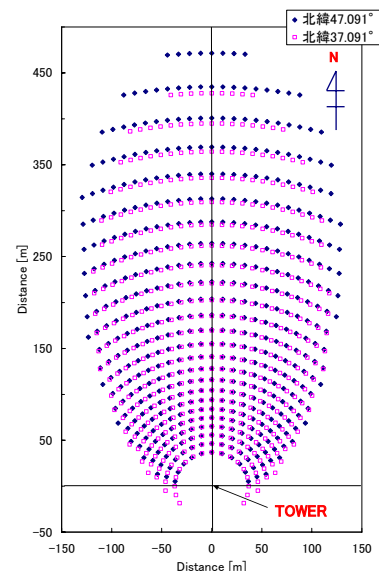


図5 緯度高さがヘリオスタット配置に及ぼす影響

4. 光束拡散を考慮した最適レイアウト

3. 2節で求めた座席情報をもとに、モンテカルロ光線追跡法によるシミュレータ⁸⁾で、光束拡散を考慮した計算を行い、個々のヘリオスタットからのレーシーパー受光エネル

ギーを算出し、大きいものから順に座席に付番した。中央反射鏡の陰の影響も考慮した。図6は得られたフィールド形状を示す。図4と異なり、偏心円形に近い形状になった。図7に示すように、これは、タワー高さの5倍以上離れたヘリオスタットからの寄与の減少が顕著になり、東西方向の座席が優先された結果による。

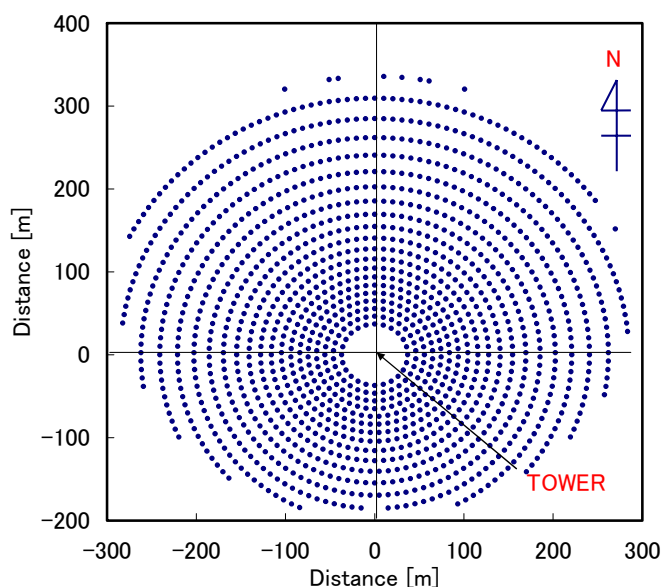


図6 光束拡散を考慮した最適レイアウト

その理由は、光束拡散により、レシーバ位置（下方焦点位置）でのヘリオスタットの像の広がりによる光の漏れに起因する。漏れは、タワー中心から離れたヘリオスタットからの反射光で顕著になる。

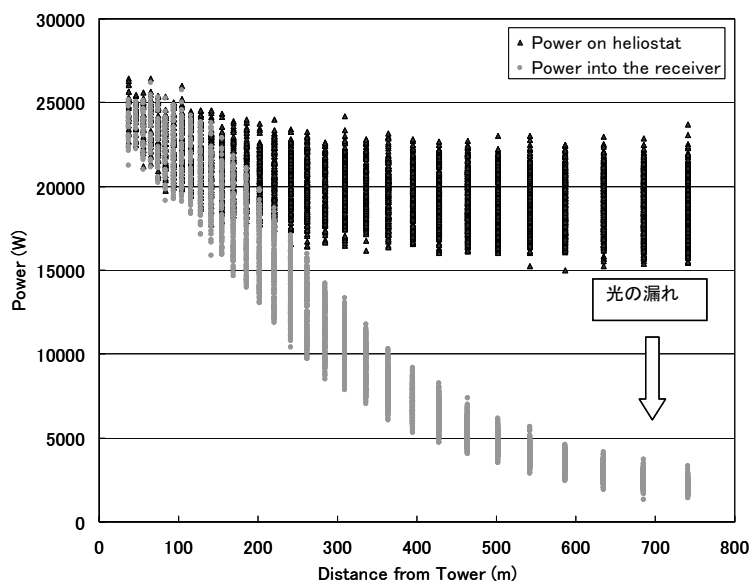


図7 ヘリオスタットの反射量とレシーバでの受光量

5. 結論

陰と反射光の遮りを最小化するヘリオスタット配置用の座席を連続体モデルにより生成し、モンテカルロ光線追跡法シミュレータで光束拡散の効果を取り込み、レシーバ集光量を最大化する座席を選択する最適レイアウト手法を開発した。ビームダウン集光系は、タワー高さの5倍以上北に離れた位置では、レシーバ開口からの光の漏れが顕在化し東西方向の座席が優先する。その結果、集光熱20MW級のプラントにおいては、年間集光エネルギーを最大化するフィールド形状はほぼ円形になることを明らかにした。

6. 参考文献

- 1) A. Segal, et al.; Comparative Performance of 'Tower-top' and 'Tower-reflector' Central Solar Receivers, Solar Energy, Vol. 65, No. 4 (1999), pp. 207-226
- 2) Hasuike, H. Yoshizawa, Y., Suzuki, A. and Tamaura, Y., 2006, Study on design of molten salt solar receivers for beam-down solar concentrator, Solar energy, 80, 1255-1262
- 3) 宇多村 元昭 他、ビームダウン集光システム用液膜流下型熔融塩レシーバの開発、日本機械学会年会、2000. 9
- 4) A. Segal and M. Epstein; The Optics of the Solar Tower Reflector, Solar Energy, Vol. 69, Nos. 1-6 (2001), pp. 229-241
- 5) 蓮池 宏 他、多重リング中央反射鏡を用いるビームダウン式集光システム、平成17年度日本太陽エネルギー学会・風力エネルギー協会合同研究発表会、H18. 10
- 6) 玉浦 裕 他、W0 2006/025449 A1; 太陽光集熱器、太陽光集熱用反射装置、太陽光集光システムおよび太陽光エネルギー利用システム、(2005. 8)
- 7) Sanchez, M. and Romero, M., Methodology for generation of heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces, Solar Energy, Vol. 80 (2006) 861-874
- 8) 宇多村 元昭 他、集光太陽熱用集光シミュレータの開発、日本太陽エネルギー学会講演会、2006. 10