

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

Optimization of a Cassegrainian Tower Concentrator with Innovative Horizontal Heliostats

鈴木 研夫 *¹
Akio SUZUKI

湯浅 実 *²
Minoru YUASA

玉浦 裕 *³
Yutaka TAMAURA

Abstract

Cassegrainian or Beam-Down type of tower concentrator is studied to optimize in terms of the plant scale, the secondary size and shape and the combination with the newly designed horizontal heliostat. The Cassegrainian tower concentrator has been designed mainly supposing to receive solar beams on the ground rather than on the top of a center tower like Solar I/II in USA. This study, however, supposes to build the tower with the Cassegrainian design: the solar beam is received on the receiver plane at the top of the tower. Typical three Cassegrainian geometries, ellipsoid, hyperboloid and plane, are compared in their solar concentrating features. The best optimization is given to the hyperboloidal secondary and the planner mirror is also a good candidate. The ellipsoidal secondary shows a similar optical characteristics to others but the shape becomes unrealistically large size which causes the economical disadvantage as well as the shadow problem on the field area.

キーワード: タワー集光系, ヘリオスタット, ビームダウン

Keywords: tower concentrators, heliostats, beam-down, Cassegrain

1. はじめに

アメリカの Solar I および II など代表されるタワー集光系を用いた太陽熱発電プラントの多くでは、タワー頭頂部周囲で、地上に置かれたヘリオスタット群で反射される直達太陽光を受光する [1]。熱化学反応に太陽光を利用する場合、必要な温度は多くの場合 1000-2000 K であり [2]、必然的に高倍率集光が期待できるタワー集光方式が想定され、その温度でプラントが運転できるためには、1000-2000 程度の大きさの集光倍率を必要とする [3]。この場合には、先の熱発電プラントに用いられている様なバルクでの集光よりは、面で、より高密度 (倍率) の集光が必要となる。実際スペイン、アルメリアの European Solar Research Centre in Almería の PHOEBUS [3] では、タワー頭頂の集光面をタワー北側に偏在したヘリオスタット群に向けた事により高倍率集光を行っている。

後述されるが、本論文で用いられる水平置きヘリオスタットを用いる場合、有効な集熱量をより高強度で得るためには、集熱タワーをヘリオスタットフィールド中心に置いた配置が有効である。しかしこの配置で面集光を行うためには、タワー頭頂の照射面を下に向けた構成となり、配管等の構造上からも適当とは言えない。それを避けるために、空中のヘリオスタットの集光ターゲット近傍に下向きの反射面を設置すれば、集

光ビームを地上方向に反射させて上向きの集光面で集熱する事ができる。この光学系は、天体望遠鏡で用いられている Cassegrain 光学系と類似のものであるが、二次反射面の形状としては、回転双曲面 (hyperboloid)、平面 (plane) および回転楕円面 (ellipsoid) の 3 種類が知られている。それぞれの幾何学形状では、垂直に並ぶ 2 つの焦点 (平面の場合は上方ターゲットポイントと下方虚像であるが、ここでは焦点として述べる) の上方焦点に向けて太陽光をヘリオスタットを用いて照射する事で、下方焦点で集光する様に設計される。このビームダウン式集光系では、高所に置いたこれら二次集光系によってヘリオスタットの高度と同じ地上に焦点を結ぶ事を目的とするが、その場合には回転双曲面が優れた特性、すなわち高倍率、高強度の集光特性を示す。イスラエルの Weizmann Institute of Science ではこの方式が採用されている [4]。しかしながら、地上に焦点を置こうとする場合には、ヘリオスタットがターゲットとする上方焦点と下方焦点との間の距離が大きくなり、結果として集光部が広がり集光倍率が低下する傾向にある。特にヘリオスタット面積が大きくなれば、より光学的エラーが大きくなり、より焦点部がぼやける。これを補償するためには、非結像光学系である Compound Parabolic Concentrator (CPC) などの三次集光系を利用する事になるが、設備としても大きくなり、光学的損失の原因を増やす事になる。

本論文では、集光部を地上に置く事にとらわれずに、タワーを建ててその頂上での集光を想定してビームダウン式のタワー集光系の設計を行った。このタワーを利用する事により、上方および下方の両焦点間距離が縮まり、光学的に優れた特性を実現する事が出来る。二次集光系の形状は、フィールドの大きさ (半径) に依存して最適形状が求まり、フィールド半径が大きくなるにつれて、凹双曲面 → 平面 → 凸双曲面と変化する。

*1 東京工業大学炭素循環エネルギー研究センター
客員教授

(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

e-mail: a.suzuki@ccre.titech.ac.jp

*2 東京工業大学理学部化学科

*3 東京工業大学炭素循環エネルギー研究センター教授
(原稿受付: 2003 年 3 月 6 日)

更に本論文では、新たに水平置きへのリオスタットを提案してタワー式集光系の設計を行っている。この水平へのリオスタットでは、垂直軸周りの回転と、構成するセグメントミラー長軸周りの回転の二つの軸で追尾を行い、軽量構造になることもあって追尾動力が少なくてすむ事が期待できる。更に、ブロッキングとシェイディング損失が各へのリオスタット内で完結するために、フィールド上に密に並べる事が可能である。

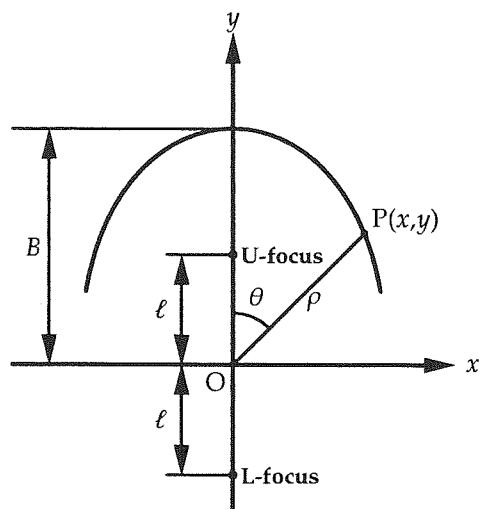


Fig. 1: Geometry of ellipsoidal secondary

2. 二次集光系と座標系の定義

本論文で対象とする二次集光系の形状は、それらの幾何学的・光学特性を考慮して回転楕円面 (ellipsoid), 回転双曲面 (hyperboloid) および平面 (plane) の3種類である。Figure 1は回転楕円面断面を示す。楕円の持つ2つの焦点は、共にy軸上に、原点をその中心に挟んで垂直に並んでいる。その間隔は 2ℓ (m) である。この楕円の長軸を B (m), また楕円上の点Pと座標原点Oとの距離を ρ (m), y軸から時計回り方向の直線OPとy軸上の成す角度を θ (rad) とする時、 ρ の表式は、

$$\rho = B \sqrt{\frac{(B/\ell)^2 - 1}{(B/\ell)^2 - \cos^2 \theta}} \quad (\text{m}) \quad (1)$$

となり、点Pの座標 (x, y) は、

$$\begin{cases} x = \rho \sin \theta \\ y = \rho \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

である。Figure 1の楕円の図において各種変数を定義しているが、変数 B が $-\ell < B < \ell$ の範囲にあると、式(1)は双曲線となる。但し、 $B = 0$ の場合はx軸と一致するものとする。本論文で検討した二次集光系をTable 1にまとめる。

Figure 2には、タワー集光系の座標系を示した。へのリオスタットフィールドである地面から高さ H (m) の位置に下方焦点があり、Fig.1と同様に座標原点は二つの焦点間中央にある。実際のタワープラントでは、下

Table 1: Secondary concentrators studied in this work

1	$(0 <) \ell < B$	Ellipsoid
2	$(0 <) B < \ell$	Hyperboloid (upper)
3	$B = 0$	Plane
4	$-\ell < B < 0$	Hyperboloid (lower)

方焦点が高さ H の塔(以下ラボタワーと呼ぶ)の頂上となる。このラボタワーのために、へのリオスタットの配置は最小半径 r_{in} から最大半径 r_{out} の間のドーナツ状のへのリオスタットフィールド内となる。

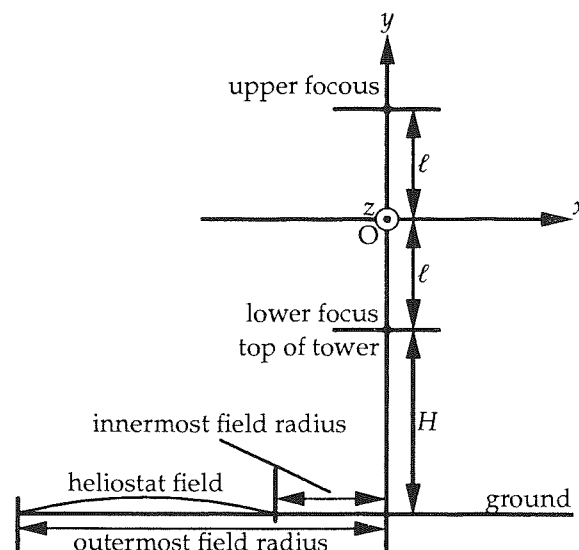


Fig. 2: Schematic geometry of tower concentrator

各へのリオスタットは、太陽光を二次集光系で反射させてから下方焦点に当たる様に制御される。4種類の各二次集光系の集光イメージをFig.3に示す。最適な二次集光系の条件は、集光部(下方焦点)平面における照射領域内の平均集光比が最大となる事である。この条件が満足される様に各パラメーターが決定される。

これまで二次集光系を用いたタワー集光系では、タワー頂上に直接二次集光系を下向き設置するものか、下方に向かう反射太陽光を地上で集光($H = 0$)するものが研究されてきたが、タワー頂上で面集光を前提としたビームダウン方式のシステムは検討されて来なかった。二次集光系で反射されたビームは、CPCなどの三次集光系を用いる事で更に集光倍率を上げる事も想定できるが、二次集光系のみでラボタワーを建てる事を前提とすれば、充分高い集光倍率が得られ、プラントシステムの簡素化にもつながるために本論文では敢えて三次集光系は想定していない。実際、三次集光系を利用するとしても、三次集光系の材料、冷却構造等の設計が必要であり、熱応力の問題などからその取り扱いには複雑でコスト増の原因となりかねない事が予想される。

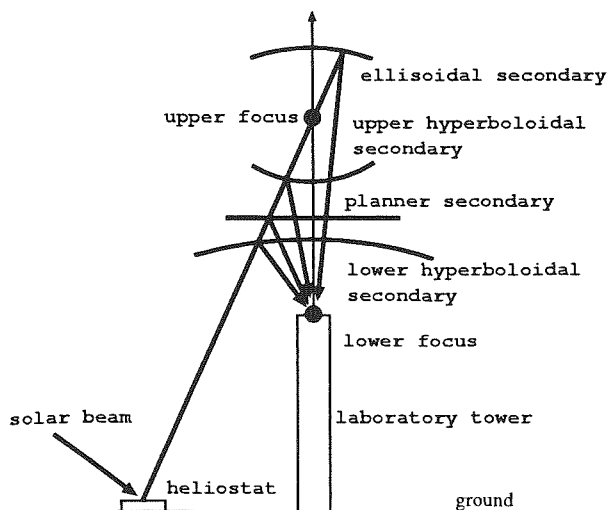


Fig. 3: Beam concentration of each secondary onto the lower focus

3. 水平置きヘリオスタット

ヘリオスタット反射面の大きさは集光部の大きさを決め、集光倍率の大きさを左右する。ヘリオスタットはフィールド面積に応じて相当数を必要とし、単体コストがプラント全体のキャピタルコストに大きく反映される。そのため、ヘリオスタット鏡面の単位面積当たりのコストを下げるために、ヘリオスタットの大型化に向かって来た。

通常のヘリオスタットでは、大型の平面鏡が太陽を追尾するために堅牢な土台と構造を要している。例えば重量バランスを取って設計されていても、風に対するブレの抑制などのためには、やはりある程度の堅牢さが要求され、それがヘリオスタット単体コストの上昇の一因でもある。

本論文で想定するヘリオスタットは水平置きであり、反射鏡は各ヘリオスタット内でセグメント状に配置される。Figure 4には計算で想定したヘリオスタットを示す。リング状の枠が水平に置かれ、その内部にセグメントミラーが平行に配置される。全てのセグメントミラーが上向きになる時にお互いの間隔が0となる。太陽の追尾は、リング枠の垂直軸回りの回転と、セグメントミラーの長軸回りの回転の二軸で行われる。通常のヘリオスタットと比べ、重量をバランス良く支えるために追尾動力が少ない事が期待される。また架台の堅牢さも、通常のヘリオスタットほどの強度は必要なく、水平置きであるために風に対しても影響が小さい。構造も単純であり、コスト的には従来のものより安価に製造および設置出来るのであれば、ヘリオスタットを小型化してプラント全体の集光能力を上げる事が可能である。

このヘリオスタットのミラーの反射以外の損失(幾何学的損失)は、太陽光のヘリオスタットへの入射角(α (rad))と、ヘリオスタットからプラント中央の上方焦点への反射角(β (rad))のみで決定される。詳細はAppendixに述べるが、簡単にTable 2にまとめる。ここで、 G_α (W/m^2) および G_β (W/m^2) はそれぞれ直達太陽光の法線面光強度と反射光の法線面光強度である。

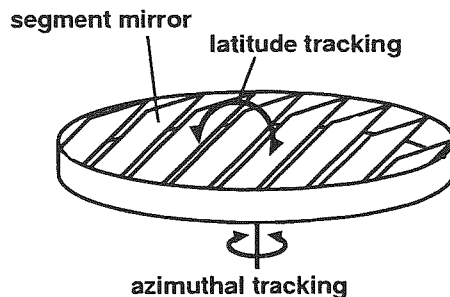


Fig. 4: Schematic diagram of a horizontal heliostat

Table 2: Geometric optical character of the horizontal heliostat

incidence angle	reflected frac.	reflected rad. (W/m^2)
$\alpha < \beta$	$\cos \beta / \cos \alpha$	$G_\beta = G_\alpha$
$\alpha = \beta$	1	$G_\beta = G_\alpha$
$\alpha > \beta$	1	$G_\beta = G_\alpha \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$

Figure 5にヘリオスタットと上方焦点の位置関係を示す。ヘリオスタットからの反射角(β)はフィールド中心からの距離と上方焦点の高さからのみ決まることから、フィールド中心から同じ距離にあるヘリオスタットは全て同じ光学特性を持つ事がわかる。すなわち、本ヘリオスタットを用いるタワー式集光プラントでは、それを建造する緯度にかかわらずタワーを取り囲む様に配置する事ができる。また、通常のヘリオスタットで問題となる隣接ヘリオスタットとのブロッキング等の損失は、水平ヘリオスタットでは個々に完結しているためにそれぞれのヘリオスタットは密に並べる事ができる。

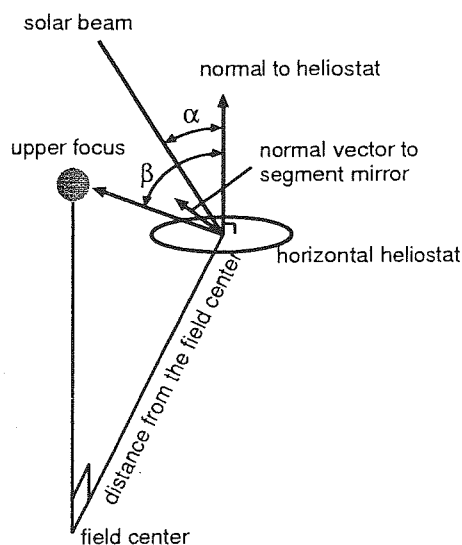


Fig. 5: Relative location and incidence and reflection angles of a horizontal heliostat

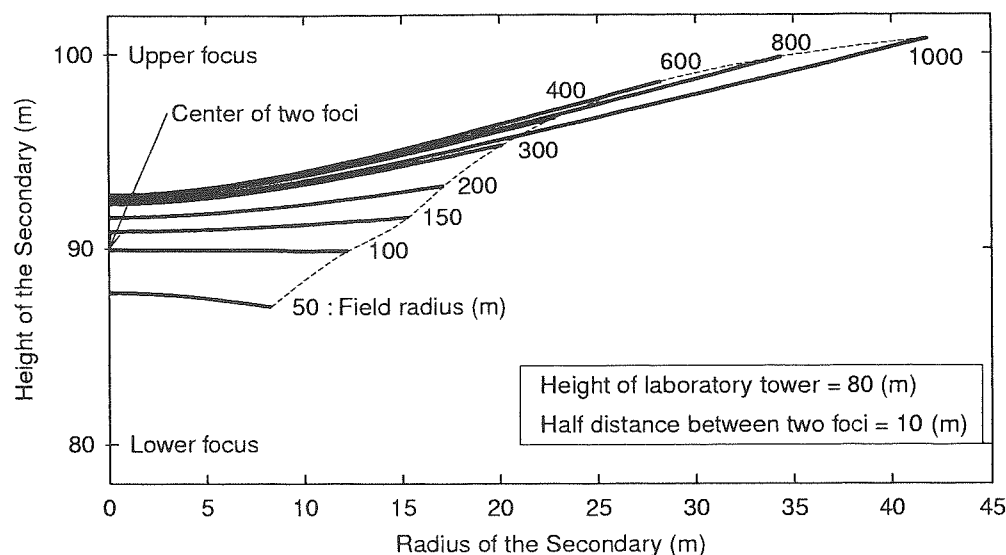


Fig. 6: Optimum secondaries according to the field radius

4. ビームダウン光学系の集光特性と最適設計

ここで扱われる集光系を設計するパラメーター数は多く、いくつかの制約をつけないと最適化は難しい。二次集光系の最適設計のためには Fig.2 における、フィールド半径、ラボタワー高さ (H (m)) および上方焦点位置 (ℓ および B (m)) (Fig.1) により決定される) を固定する必要がある。まずこれらのパラメーターを決めるために、それぞれの二次集光系に対して準備計算を行い各種パラメーターの大きさの目安をつけた。計算方法は、通常のレイトレース法に加え、フォトメトリー法も用い、両方法で同じ結果が得られる事を確認しながら計算を行った。計算対象とする日射は直達太陽光のみであり、周辺光の影響は無視している。太陽像の強度分布は Jose の式 [5] を採用している。太陽位置に関しては、単純に直上 (赤道直下の南中時) を仮定した。太陽位置の影響は、緯度ではなく、単に太陽高度のみによって決定され、太陽高度が低いほどタワーから遠方のヘリオスタットの寄与は小さくなる。ここでは簡単のために垂直入射のみに対して計算を行っているが、最大太陽高度が低い地域 (緯度の高い地域) では遠方フィールドの寄与がより小さくなるが、最大集光比を与える最適条件は同じである。

Ellipsoidal Secondary (ES) ES はお椀を逆さにした様な形状で、二つの焦点が近くなると曲率半径が小さくなる。この曲率のために、近軸光線に対しては期待される下方焦点より手前で疑似焦点を作り、実際の集光部では逆に光線が広がって集光倍率が低下する傾向がある。下方焦点位置を高くすれば改善の傾向が見られるが、他の二次集光系と比べても光学的な優位性は見られない。

Upper Hyperboloid (UH) 天体望遠鏡に用いられる Cassegrain 光学系は主にこの形状が用いられている。二次集光系は上方焦点より下に位置するために ES と比べて小型になる傾向がある。ES と同様にラボタワーが高い方が集光特性は優れているが、ラボタワーが低くなると大きな劣化をきたし、CPC の様な三次集光系を利用しなければ高倍率を維持できない。しかし CPC は、許容入射角度が小さくかつ集光部面積が大きくなるため、大型化する傾向が顕著であるので、現実的にはトランケーション等により光学特性を犠牲にして設計する必要がある。この傾向はここで扱う三種類の二次集光系の共通の特徴である。

Planner Mirror (PM) 平面鏡は製造上のメリットが非常に大きい。下方焦点の高さが低くなると規模が大きくなり、ヘリオスタットにかかる陰の影響が甚大となる。もし下方焦点を地上に置くとすると ($H=0$)、PM の半径はヘリオスタットフィールド半径の半分となる。しかし下方焦点位置が高ければ、他の二次集光形状と比べてもその集光特性は優れていると言える。

Lower Hyperboloid (LH) 同じ hyperboloid であるが、UH が上方焦点直下に位置していたのに対し、LH は下方焦点より上に位置しており凹面鏡となる。フィールドが大きくなるにつれて遠くのヘリオスタットからの太陽光の入射角度のために、その形状は PM に近付いて行くため小フィールド向けの二次集光系である。

計算条件 相当数の準備計算と、現実的なプラント規模を想定して以下の仕様で計算を行った。

Outermost radius of heliostat field :	50-1000 (m)
Height of laboratory tower (H) :	80 (m)
Half distance between two foci (ℓ) :	10 (m)
Diameter of the heliostat :	3 (m)

ミラーの反射率は全て1を仮定し、反射損失は考慮されていない。これは実際の使用においては塵等により反射率の変化が大きく、概算値も想定し難いためである。理想的な状況でも、集光倍率の値は計算値から20-30%程度は低く見積もる必要があるであろう。三次集光系を用いるのであれば、更に低下する。ヘリオスタットフィールドの最小半径(innermost field radius)は、下方焦点位置での集光領域の大きさが、ヘリオスタットからの太陽光をブロックしないという条件で最も近いヘリオスタット位置として決定される。ヘリオスタットの配置はタワー中心に同心円上にちゅう密に配置している。つまり隣接するヘリオスタットとの間隔は、最小値0、最大でもヘリオスタット直径未満となる。

先に述べた通り、最適化の条件は、ヘリオスタットからの全ての反射光が到達する集光部面積が最小、すなわち集光部での照射面積内の平均集光倍率が最大になる条件である。先に述べた仕様を元に、各種二次集光系に応じて計算した結果、フィールドの大きさによって最適な二次集光系が決定される事がわかった。Figure 6にその計算結果を示す。

Figure 6において、横軸は二次集光系の半径、縦軸は二次集光系の地上からの高さを表しており、各ラインは各フィールドにおいて最適化された二次集光系の断面を表している。Figure 2に示した座標原点が地上から90(m)であり、二つの焦点はその位置からそれぞれ ± 10 mの間にある。各曲線はそれぞれのフィールド半径の条件で最適化された二次集光系の断面である。フィールドが小さい時にはLHが最も高い集光倍率を与える。フィールド半径が大きくなるにつれて最適二次集光系位置が上昇し、それにつれて形状がUHに変化して行くのがわかる。その中間であるフィールド半径100 (m)では(図では非常に平らなLHであるが)PMが最適形状となる。図に見られる通り、フィールドが大きくなりUHが最適形状を与えるとしてもかなり平面に近いのが特徴である。ラボタワーの高さを低くする事を考えると、相似形の関係から二次集光系の形状は大きくなる。その一方で、相対的にヘリオスタットのサイズが小さくなるために、集光特性は改善される方向に向かう。この二次集光系の大きさを制限するためには丸みを帯びた形状を利用する必要があるが、集光部面積も広がり、集光倍率は低下する。この場合には非結像光学系などを用いた3次集光系によって倍率を回復させる必要が生ずるかもしれない。この形状はイスラエルのWeizmann Institute of Scienceで利用されているものに近い。

ラボタワーを高くする(二焦点間距離を縮める)と理論上の集光倍率は上昇する。この場合、ラボタワー上集光部面積によるブロッキングの影響および二次集光系が小さくなる事による損失が大きくなる傾向があるために注意する必要がある。

最適な形状(最小集光部面積)は、光路程が短く、入射角度が小さくなる事、そして集光系自身の曲率などのバランスで決定されると思われる。二次集光系の高

さ変化を見ると、フィールド半径が400 mまでは高くなる傾向があったものが、それより大きなフィールドになると低くなる傾向に変わる。これについても光路程と入射角度の両者のバランスによるものと思われる。

フィールド半径に対する集光倍率の変化をFig. 7に示す。最大集光倍率は、フィールド半径が300 mの時に与えられる。各フィールド半径の計算結果をTable 3にまとめた。ここで行われた計算では、具体的なプラントサイズを決めて計算しているのであるが、最適値が得られるプラントサイズの相似を計算することにより、適当な大きさの最適プラントが得られる。表中、総受光量を表す最後の2列の単位が無いのはこれが相対値として計算されているためである。具体的には太陽の直達日射量を1として計算しており、表の数字に想定する日射強度(例えば800 W/m²)を掛けることで、その単位はWになる。この意味で、表内の数字はヘリオスタットの総面積と有効面積という解釈もできる。

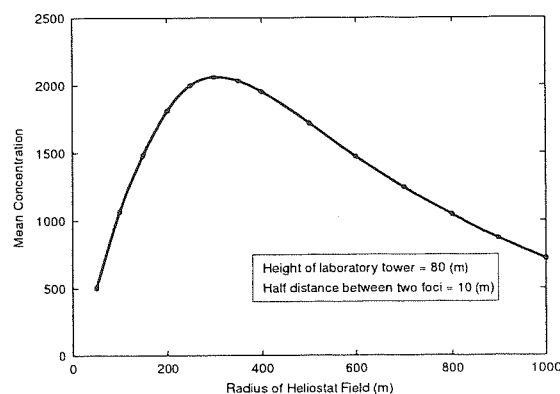


Fig. 7: Field radius dependence of the optimum concentration

5. まとめ

熱化学反応を意識した高倍率タワー式集光系について、ビームダウンのための二次集光系を用いた集光プラントの最適化を行った。Ellipsoid, hyperboloidとしてplaneのそれぞれについて検討を行った。通常ビームダウン方式は、地上での作業を意識するものであるが、本論文では光学的な特性に重点を置くために、作業用のラボタワーを建てる事を想定している。このタワーを利用することにより、CPC等の三次集光系を用いないで高倍率集光が可能である。ヘリオスタットについても、これまで想定されていた一枚の大きな平面鏡で追尾するのではなく、セグメントミラーを用いた単純構造のヘリオスタットを考案してプラントのヘリオスタットとして利用している。これらの条件により最適化の計算を行った結果、以下のような結論が得られた。

1. Ellipsoidは、幾何学的な構成から集光系位置が高くなる。他の二次集光系と比べて曲率半径が小さくなる傾向があり、そのために集光部での倍率が低下する。曲率半径を大きく取ることによって高い集光倍率を達成する事も可能であるが、その場合には集光系の高さが必要となるだけでな

Table 3: Results of optimized concentration system with the relative radiation to the direct normal radiation received in the field

field radius (m)	Concent.	Radius of receiver (m)	Max. inci. angle (deg)	total radi. in field (-)	total radi. at focus (-)
50	502	1.8	42.4	5407	5095
100	1067	2.4	45.3	23694	19573
150	1483	2.9	49.1	54280	38605
200	1812	3.2	49.6	97172	59836
300	2060	4.0	50.7	219939	105240
400	1952	5.0	52.0	391981	152304
600	1472	7.3	55.0	882605	246961
800	1043	10.2	58.5	1569664	341880
1000	718	13.9	62.4	2452056	435711

く、集光系半径も大きなものとなり、フィールドにかかる陰の影響が無視できなくなる。また製造上の問題もあり、コスト点においても他の二次集光系と比較して有利な点は見られなかった。

2. フィールド半径が小さい場合には、凹面の hyperboloid が最適形状となり、フィールドが大きくなるにつれて平面に近付いて行く。その後凸面の hyperboloid が最適形状となり、集光部での最高集光倍率が出現する。この最適構成を相似的に規模を変えれば、必要な容量のプラントサイズが得られる。
3. 新型のヘリオスタットについては、その単純な構造と水平設置という事から、これまでのヘリオスタットよりも安価に製造および設置できる可能性がある。

これらのデータを元に、今後は熱化学反応炉の設計およびプラントのコスト計算等の経済性の調査を行い、実用プラントのデータとして充実させて行く必要がある。また、集光倍率においては必要に応じて三次集光系を利用する可能性があり、更に集光倍率を上昇させる余地がある。今回の最適化では、集光部に到達した太陽光を全て利用する事を前提としていたが、実際には集光部でのベル型の集光分布では、中心が高く、裾が広がる分布が大きなフィールド面積の計算で得られている。この場合、100% の利用効率ではなく、多少の妥協によって例えば 95% の利用効率を前提とすれば、大きなフィールドでより高倍率の集光が可能であり、最適なプラントサイズは大きくなる方向にシフトする。

References

- [1] C.-J. Winter, R. L. Sizmann and L.L. Vant-Hull (Eds.), *Solar Power Plants*, Chap.7, Sec.7.4, Springer-Verlag (1991).
- [2] Edward A. Fletcher, *Solarthermal Processing: A Review*, *Journal of Solar Energy Engg.*, vol.123 pp.63-74 (2001).

[3] Manfred Shemitz-Goeb and Günter Keintzel, The Phoebus Solar Power Tower, *EuroSun'96*, pp.476-481 (1996).

[4] A. Yogeve, A. Kribus, M. Epstein and A. Kogan, Solar "Tower Reflector" Systems: A New Approach for High-Temperature Solar Plants, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol.23, pp.239-245 (1998).

[5] Paul D. Jose, The flux through the focal spot of a solar furnace, *Solar Energy*, vol.1 pp.19-22 (1957).

Appendix: 水平ヘリオスタットの幾何学的光学特性

水平ヘリオスタットの幾何学的光学特性は、本文での述べた通り、太陽光の入射角と二次光学系上方焦点に向けた反射角のみで決定される。ここで議論する幾何学的位置関係と記号の説明を Fig.A1 に示す (Fig.5 も参照)。図中、各ベクトルは全て単位ベクトルである。また、ここではセグメントミラーの縁の影響は無視している。

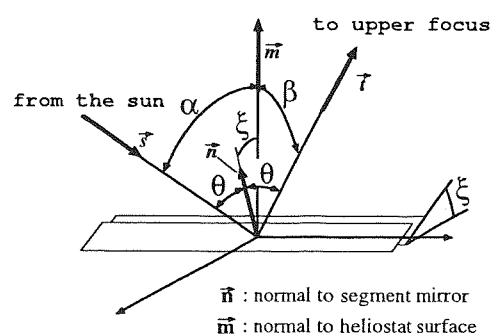


Fig. A1: Geometry of the relation of solar beam reflection and segment mirror

ヘリオスタットへの入射角 α および反射角 β は、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= -\vec{s} \cdot \vec{m} \\ \cos \beta &= \vec{r} \cdot \vec{m} \end{aligned} \right\} \quad (A1)$$

より計算される。また、セグメントミラー表面の法線ベクトル $\vec{n}$ は入射光と反射光の関係から、

$$\vec{n} = \frac{\vec{t} - \vec{s}}{2 \cos \theta} \quad (\text{A2})$$

で表す事が出来る。各セグメントミラーの水平面からの傾き ξ は、

$$\cos \xi = \vec{n} \cdot \vec{m} = \frac{1}{2 \cos \theta} (\vec{t} \cdot \vec{m} - \vec{s} \cdot \vec{m}) \quad (\text{A3})$$

となる。Figure A2 は、セグメントミラーの断面方向から見た図である。セグメントの水平面からの傾きは ξ であるが、このセグメントミラー断面内での入射光の等影入射角度を ξ_α 、反射光の等影入射角度を ξ_β と置く。この時、それぞれの等影入射角は幾何学的関係より、

$$\left. \begin{aligned} \cos \xi_\alpha &= \frac{-\vec{s} \cdot \vec{m}}{\sqrt{(-\vec{s} \cdot \vec{m})^2 + (-\vec{s} \cdot \vec{d})^2}} = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{\cos^2 \theta + (-\vec{s} \cdot \vec{d})^2}} \\ \cos \xi_\beta &= \frac{\vec{t} \cdot \vec{m}}{\sqrt{(\vec{t} \cdot \vec{m})^2 + (\vec{t} \cdot \vec{d})^2}} = \frac{\cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\vec{t} \cdot \vec{d})^2}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A4})$$

となる。ここで $\vec{d}$ はセグメントミラー上で法線ベクトル $\vec{n}$ と垂直な単位ベクトルである。 $\vec{d} \cdot \vec{n} = 0$ の関係と式 (A2) より、 $\vec{d} \cdot \vec{t} = \vec{d} \cdot \vec{s}$ が成り立っている。

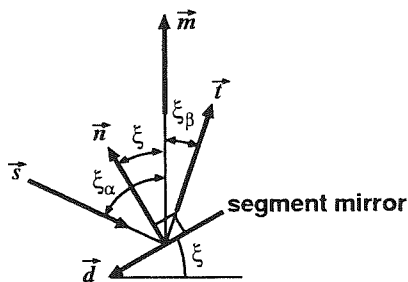


Fig. A2: Geometry of the projected view on the perpendicular plane to the segment mirror

太陽光の入射角 α と反射角 β が等しくなる場合 ($\alpha = \beta$)、幾何学的な考察から $\vec{s} \cdot \vec{n} = \vec{t} \cdot \vec{n}$ 平面と、 $\vec{m} \cdot \vec{n} = \vec{d} \cdot \vec{n}$ 平面は互いに垂直に交差する事がわかる。この時、式 (A4) と $\vec{d} \cdot \vec{t} = \vec{d} \cdot \vec{s} = 0$ より

$$\cos \xi = \frac{\cos \alpha}{\cos \theta} = \frac{\cos \beta}{\cos \theta} \quad (\text{A5})$$

を得る。すなわち、

$$\xi = \xi_\alpha = \xi_\beta \quad (\alpha = \beta) \quad (\text{A6})$$

である。ここで見ているのはセグメントミラーの長軸方向に対する断面であり、この条件式は、太陽光から入射する光線が(ブロッッキングもシェイディングも無しに)ミラー正面から垂直に入射することにより全て反射する事を示している。

Figure A3 には $\alpha < \beta$ の条件、すなわち太陽の位置が高い時の太陽光のヘリオスタットへの入射を表して

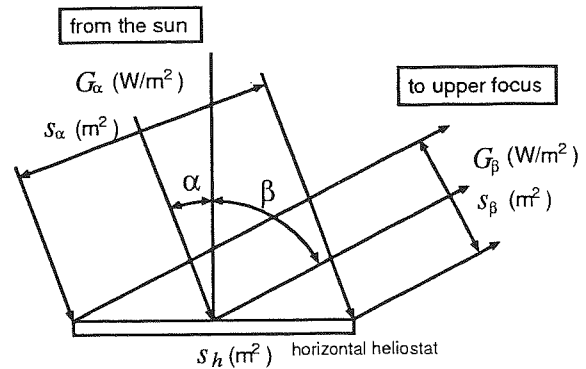


Fig. A3: Solar beam reflection at the heliostat: $\alpha < \beta$

いる。太陽光の法線面光強度を G_α (W/m^2)、入射ビームの断面積を s_α (m^2)、また反射光の法線面光強度を G_β (W/m^2)、反射ビームの断面積を s_β (m^2) で表す。またヘリオスタット面積は s_h (m^2) である。この条件の下では式 (A4) より、 $\xi_\alpha > \xi_\beta$ である。反射によって光強度は変化せず、またタワー方向(角度 β 方向)からはセグメント間の空隙を見る事はないので反射光は均一な密度でタワーに向かう。すなわち、 $G_\alpha = G_\beta$ が成立する。入射総量 $G_\alpha s_\alpha$ (W) から、反射総量 $G_\beta s_\beta$ (W) を差し引いた量が損失となり、 $s_\alpha = s_h \cos \alpha$ および $s_\beta = s_h \cos \beta$ の関係を考慮すれば、入射光のうち反射光として出て行く割合が $\cos \beta / \cos \alpha$ である事が導かれる。この時、反射総量 $G_\beta s_\beta$ は $G_\alpha s_h \cos \beta$ で表される。 G_α が一定値であれば、この値も一定値となり、 $\alpha < \beta$ の条件において、いくら太陽が高くなってもあるヘリオスタットから来る太陽光は一定値である事がわかる。

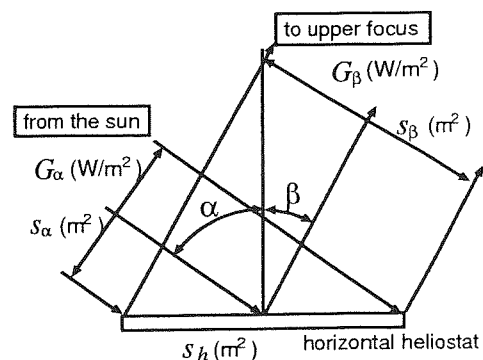


Fig. A4: Solar beam reflection at the heliostat: $\alpha > \beta$

一方 $\alpha > \beta$ の場合には、太陽方向からはセグメントミラー間の空隙は見え、全ての光線はタワー方向に反射されるために損失はない ($G_\alpha s_\alpha = G_\beta s_\beta$ (W)). しかしながら反射ビームの断面積は入射光のそれよりも大きく ($s_\alpha < s_\beta$)、それゆえ光強度は薄められることになる。つまり、 $G_\beta = G_\alpha (\cos \alpha / \cos \beta)$ (W/m^2) である事が導かれる。実際にはビームが縞模様になるが、計算上は均一に薄まったものとして扱っている。