

多重リング式ビームダウン型太陽熱発電システム における集光光学系

森 伸 芳*・玉 浦 裕**

Concentrating Optical System with Multi-Ringed Central Reflector for Beam-Down Concentrated Solar Thermal Power Generation

Nobuyoshi MORI* and Yutaka TAMAURA**

Concentrated solar thermal power system (CSP) is most prospective candidate for the sustainable energy in succession to the usual thermal power generation. The object of study of CSP has transferred to Tower top system from the traditional parabolic trough system. And there has been great hope that the beam-down system will have higher efficiency. Then the multi-ringed beam-down system is proposed. It contains several challenges which innovates the CSP system. In this report, we will explain the aspects of the multi-ringed beam-down system and the dielectric multi layered mirror for the secondary mirror, which is fundamental to the beam-down system.

Key words: concentrated solar thermal power, beam-down, dielectric multi layered mirror, secondary mirror

産業革命以来、熱機関など機械が発明され一人当たりのエネルギー使用量が増加し、さらに人口も増加してエネルギー消費量は指数関数的に増加している。エネルギー需要はこれまで化石燃料で賄ってきたが、CO₂などの温室効果ガスによる地球温暖化問題がクローズアップされることとなった。今後の人口増加とエネルギー使用量の増加に対応していくためには、温室効果ガスを出さないクリーンエネルギーへの移行が急務である。クリーンエネルギーの有力候補の原子力発電も、安全性と大量の核廃棄物という負の遺産を直視すると「クリーンエネルギー」とはいいがたない。また、資源という観点からも化石燃料や核燃料は無尽蔵ではなく、人類の活動を持続可能とするエネルギー源が必要である。

持続可能エネルギーとして今後最も期待されるのは太陽エネルギーである。将来的には核融合が実用化される可能性はあるが、手軽に安全にかつ地球の熱収支のバランスを

保って使えるエネルギー源は太陽エネルギーしかない。本稿では、持続可能エネルギーの有力候補のひとつである集光太陽熱発電について概観し、新規に提案された多重リング式ビームダウン型集光太陽熱発電システムの光学系について解説する。

1. 集光太陽熱発電の原理

集光太陽熱発電 (concentrated solar thermal power: CSP) は図1のように反射鏡により太陽光を集め、これを熱として利用し、火力発電や原子力発電と同様に蒸気タービンなどの発電装置を運転するものである。集光による熱は、油や熔融塩といった蓄熱媒体に蓄えられ発電装置に送られるのが一般的である。

2. 集光太陽熱発電の集光光学系¹⁾

CSPは集光のしかたから線集光方式と点集光方式に分

*コニカミノルタアドバンストレイヤー(株)アドバンスフィルム事業統括部 (〒192-8511 東京都日野市さくら町1番地)
E-mail: n.mori@konicaminolta.jp

**東京工業大学炭素循環エネルギーセンター (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

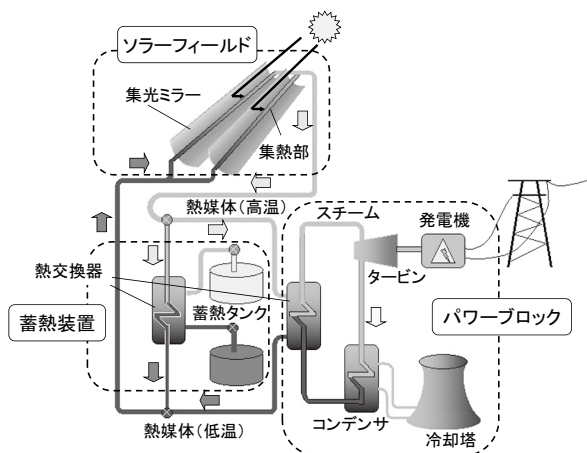


図1 集光太陽熱発電のシステム概念図。

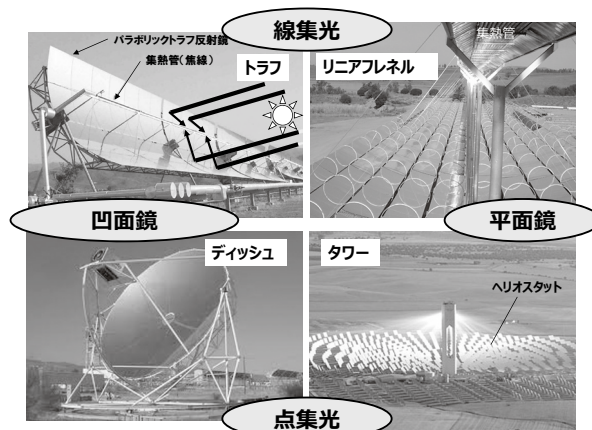


図2 集光太陽熱発電の集光光学系。

けられる。図2に現在のCSPで用いられるおもな集光方式を分類して示す。線集光方式はライン状に配置された集熱部に光を集める。反射鏡は集熱部に沿って押し出したような形状となっており、反射鏡各点での法線ベクトルは押し出し方向と直行する平面への射影空間内にある。光線はこの射影空間内で反射の法則を満足する。

2.1 トラフ型

トラフ型の反射鏡は断面が放物線となる樋状で、反射光はパラボリックトラフの焦線上に集められる。焦線は一般的には南北に配置され、これと平行な軸の周りで全体を回転させ太陽を追尾する。この方式は20年以上の実績を有し、現在稼働しているほとんどのプラントがこの方式で、数百MWの大規模プラントがある。

線集光方式の理論的な集光倍率の最大値は、太陽の視半径 0.265° とエタンデュ保存の法則から約200倍となる。集熱部にはガラス管で真空封止された金属管が配置される。追尾誤差や反射鏡の精度を考慮して、金属管の径は最大倍率の径より大きくして、反射鏡の開口径/集熱管径で70倍から100倍程度で使用される。SEGS-I-IXやスペイン南部のAndasol-1では反射鏡の幅が5.7mに対し集熱管の直径は70mmである。100~150mにわたる集熱管で熱回収し、出口で 400°C の温度を得ている^{*1,*2}。

2.2 リニアフレネル型

リニアフレネル型は線集光方式で、分割された平面鏡の向きを個々に変え、固定した集熱管に反射光を集める。集光倍率は50倍程度と低く、トラフ型より集熱温度は低くなるが、設置面積が少なく、安価な平面鏡を利用すること

ができること、また個々の反射鏡が小さく風荷重を抑えられるので、追尾機構の簡略化など経済性で期待されている²⁾。

2.3 ディッシュ型

点集光方式は回転放物面鏡の焦点に光を集めようというものであり、その代表がディッシュ型である。点集光では三次元的な反射鏡により集光倍率を高め、高温により発電効率を高められる。集光倍率は通常2000倍以上で、 $800\sim 1000^\circ\text{C}$ の高温で運転される。焦点位置には理想的なカルノーサイクルに近いスターリングエンジンが配置され、直接熱から発電する^{*3}。ディッシュ型は1台ずつ個別運転でき、直径10mの反射鏡で25kWの発電ができる小型のものから、直径20mの反射鏡で100kWの発電ができるものまである。直接電気エネルギーを得る設備であることから、PV (photovoltaic) プラントと競合する。

2.4 タワー型

タワー型はヘリオスタットとよばれる多数の平面鏡をそれぞれ独立に制御して太陽を追尾し、タワー上部に固定された集熱部に集光する。ヘリオスタットの台数を増やしていくと集光倍率を高めた大型プラントが得られる。また、ヘリオスタットには平面鏡を用いることができるので、部材の低コスト化が期待できる^{*4}。一方、大型プラントではヘリオスタットから集熱部までの距離が遠くなり、ヘリオスタットの追尾精度が課題となる。

集熱温度は 600°C と高く、熱媒体として熱容量が大きい溶融塩が使いやすい。高温の溶融塩をタンクに貯蔵することで夜間発電も可能な基幹発電所の機能を果たし、次世代

*1 https://www1.eere.energy.gov/ba/pba/pdfs/solar_trough.pdf

*2 http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=3

*3 http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_dish.pdf

*4 http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_tower.pdf

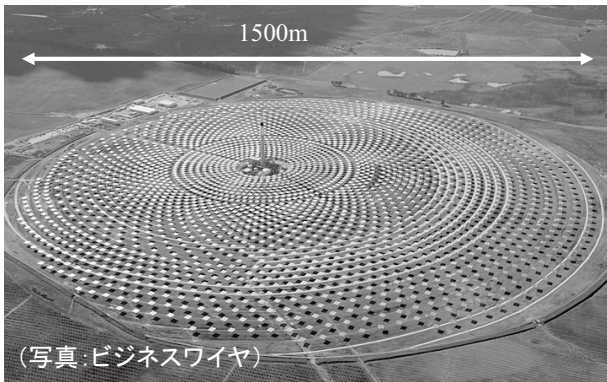


図3 スペインのGEMASOLARプラント。中央部のタワーの下部に溶融塩タンクが配置されている。

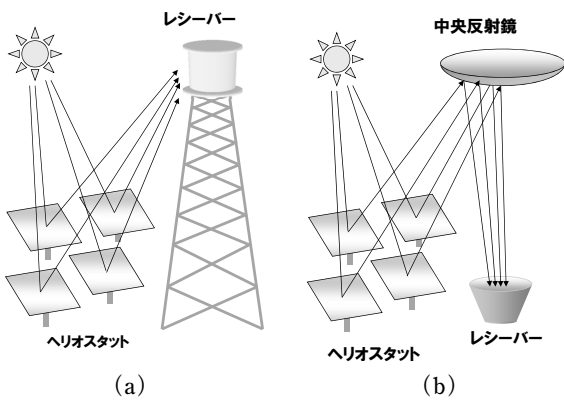


図4 タワー型 (a) とビームダウン型 (b)。

CSPシステムとして期待されている。図3は昨年10月に稼働開始した GEMA Solar で、溶融塩システム初の商用プラントであり、ほぼ24時間発電し、最大19 MWの発電能力がある。

3. ビームダウン型集光光学系

タワー型では溶融塩をタワー上部のレシーバーに送り、回収した溶融塩を地上に配置したタンクに蓄えることになるが、溶融塩の取り回しに課題がある。また集熱レシーバーは開放型で放熱による損失がある。ビームダウン型は、これらの点を改良すべく提案されたシステムであり、図4に示すように、ヘリオスタットで反射した光を上空に置かれた中央反射鏡とよばれる二次反射鏡で反射させ、地上に置かれたレシーバーに集める。この方式は、放熱を防げるキャビティー状レシーバーが使いやすく、溶融塩の取り回しも格段に容易になることが期待される。

ビームダウン型の原理は、回転双曲面の第1焦点に集光する光は、反射後第2焦点に集まるというものである。しかし、実用光学系ではコストの問題からヘリオスタットには曲面鏡は用いられず、平面鏡による近似曲面鏡が用いら

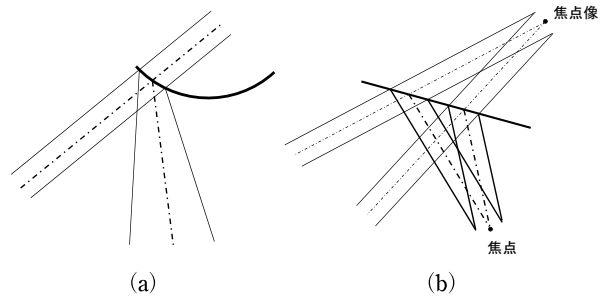


図5 曲面二次鏡 (a) と平面二次鏡 (b) による反射光。



図6 多重リング式ビームダウン型集光光学系実験プラント。

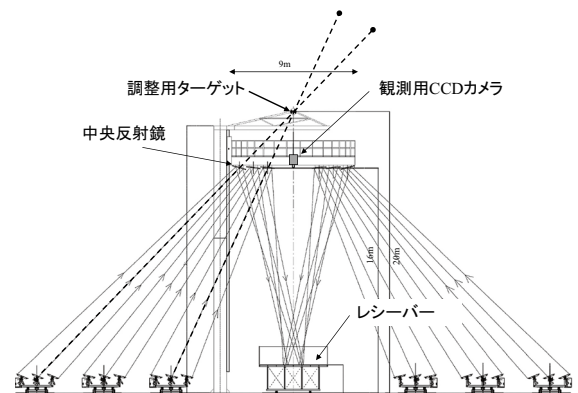


図7 集光光学系実験プラントのレイアウト。

れる。このような系では、二次鏡に入射する光は角度の異なる平行光束群となる。しかし、平行光束を曲面鏡で反射させると、図5 (a) に示すように反射後、元の光束より広がってしまう。つまり、二次鏡を曲面鏡とする場合は、理想的にはヘリオスタットも曲面鏡とする必要がある。

3.1 多重リング式ビームダウン型集光光学系

3.1.1 多重リング式中央反射鏡

玉浦らは、ビームダウン型を改良し、中央反射鏡を輪帯状の多重リング式 (フレネル式) とし空気抵抗を低減することを提案した。そしてアブダビに、図6に示す100 kW

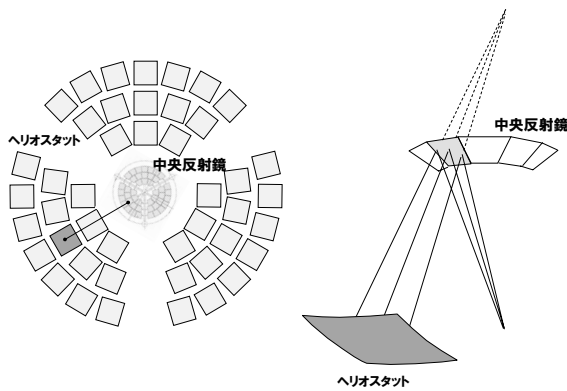


図8 ヘリオスタットと中央反射鏡の対応.

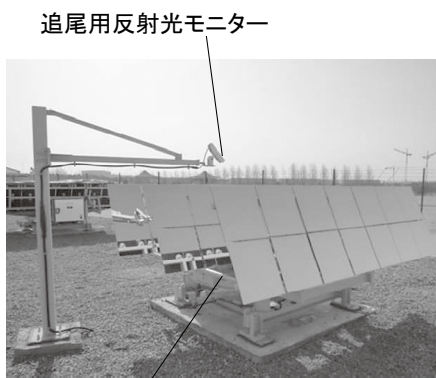


図9 ギャングド式ヘリオスタット.

の集光実験装置が建設された³⁾. 集光実験装置のレイアウトを図7に示す. この装置には2つの特徴がある. 1つは中央反射鏡を平面鏡で構成し, 図8のように各平面鏡はおのおの1台のヘリオスタットからの集束光を反射するようにしたことである. ヘリオスタットを構成する各平面鏡からの反射光束は平行で, 図5 (b) に示すように, 集光位置の中央反射鏡の平面鏡による像に集まるように入射させる. このようにすると, レシーバー上でタワー式と同等の集光性能が得られる.

3.1.2 ギャングド式ヘリオスタット

もう1つの特徴は, ヘリオスタットに図9に示す水平置きタイプのギャングド式を採用したことである. 通常は鉛直軸とそれに直交して回転する軸を有し, これに反射鏡を取り付け水平回転と上下の回転を行えるようにしたTボーン式が用いられるが, Tボーン式のアクチュエーターには, 風荷重に打ち勝って反射鏡を回転駆動させるためのトルクと, 剛性が要求される. トルクや剛性が不足すると風により角度がずれ, 集光状態が劣化しやすい. ギャングド式ヘリオスタットは1台のヘリオスタットの鏡を分割し, 分割された部分をリンク機構で連動させ, 1つのアクチュエーター

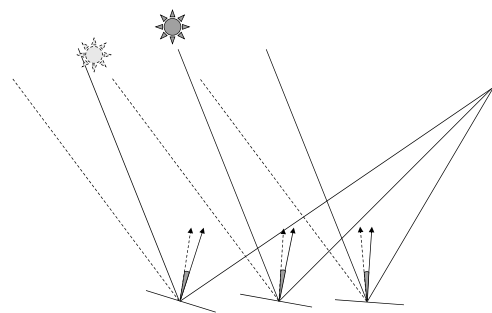


図10 ギャングド式ヘリオスタットの3列の鏡の角度差.

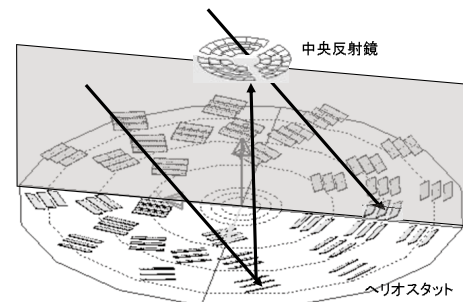


図11 太陽が天頂にないときのヘリオスタットの配置と向き.

で起伏運動させる. 水平回転は軸回転ではなく円周上の並進運動で得る. これらにより, 風抵抗が少なく, 低トルクのアクチュエーターが使えるようになる.

正確な追尾のためには軸の鉛直性やヘリオスタットと集光部の座標の正確な測量が必要であるが, 今回のギャングド式ヘリオスタットでは, 各ヘリオスタットに設けられた反射光モニターによるフィードバック制御が採用された. このモニターの向きを前述の中央反射鏡の調整用ターゲットに向くようにあらかじめ調整しておき, ヘリオスタット中央部の一部の反射光がモニターの中央に入るようにすることで, 高精度の追尾が行える.

3.2 ギャングド式ヘリオスタットの収差

今回のギャングド式のヘリオスタットは分割された3つの列からなり, おのおの列の仰角は特定の角度差があるように調整される. また, 各列の長手方向にならぶ7枚の鏡も少しずつ角度差をもたせ, 反射光が焦点の像に集光されるように調整されている. 3つの列の鏡は, 太陽高度が変化しても, 図10のようにおのおの高度変化の半分だけ法線ベクトルを回転させればこの面内で集光状態は保持できる.

しかしこの面内にあるヘリオスタットはごく一部であり, 大部分は図11のように入射面内になく, 方位角が回転した状態にある. この場合には, 3列の反射鏡からの光は焦点像に結ばなくなる. ヘリオスタットが入射面と離れ

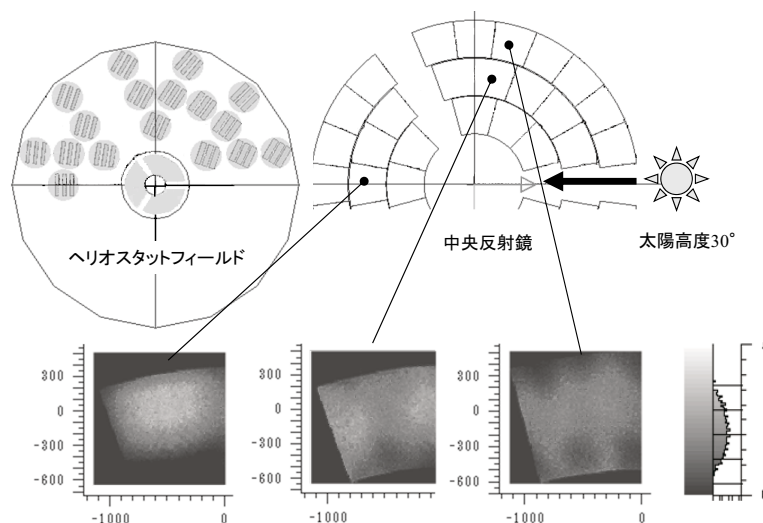


図12 中央反射鏡の各平面鏡への入射光分布。

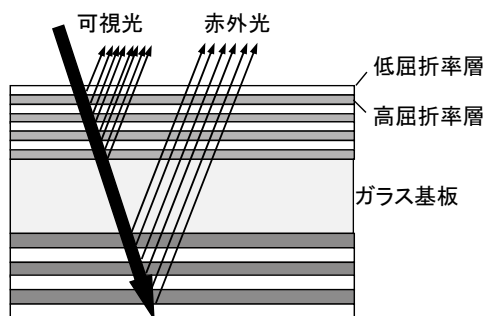


図13 誘電体多層膜ミラー。

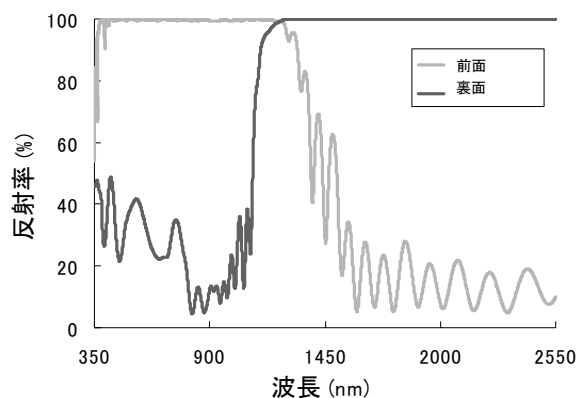


図14 分光反射率の設計値。

ていて太陽高度が低い場合に誤差は大きくなり、列間距離程度の取差が発生する。これは当初想定しなかった大きさの誤差であり、これにより中央反射鏡の平面鏡からはみ出て隣の平面鏡に入射する光線が生じ、焦点で大きな誤差となった。図12に、太陽高度30°のときの中央反射鏡上での照度分布シミュレーションを示す。入射面から離れたヘリオスタットからの光が中央反射鏡の平面鏡全面に広がっているのがわかる。

また、ヘリオスタット中央部の鏡の法線が鉛直になると、ヘリオスタットの方位角が決まらなくなるという問題もある。Tボーン式ではこのときの方位角は任意でよいが、ギャングド式では他の2列の反射鏡には最適方位角がある。つまり中央部の鏡からの光の向きだけでは最適角は決定できず、プログラム制御が必要である。

4. 中央反射鏡

4.1 中央反射鏡の課題

ビームダウン型では、前述のようにヘリオスタットからの集束光が入射するので、中央反射鏡への入射光強度は何

倍にも大きくなる。今回の実験装置では40倍程度であるが、実用プラントでは50倍以上の強度の太陽光を入射させる必要がある。したがって、鏡に吸収があると、発熱し高温になることが懸念される。例えば、アルミ増反射鏡では可視光の反射率が95%以上であるが、800 nm以上の近赤外で材料由来の吸収があり、反射率は低下する。太陽光スペクトルの加重平均で15%程度の吸収となる。直達太陽放射強度(DNI)が1 kW/m²で、その50倍がこの鏡に一樣に入射するとき反射鏡の温度は280°Cと見積もられる。実際には1枚の鏡内にも入射光強度にはむらがあるため、最高部の温度は300°Cを超えると推定される。

4.2 中央反射鏡へのソリューション

この課題に対し、コニカミノルタは誘電体多層膜ミラーによる構成を提案した。高反射率にして吸収を極力減らして発熱を防げば、反射鏡の耐久性にかかわるいろいろな課題を解決できる。誘電体多層膜ミラーは、図13のように異なる屈折率の酸化物薄膜を交互に積み重ねて境界面から

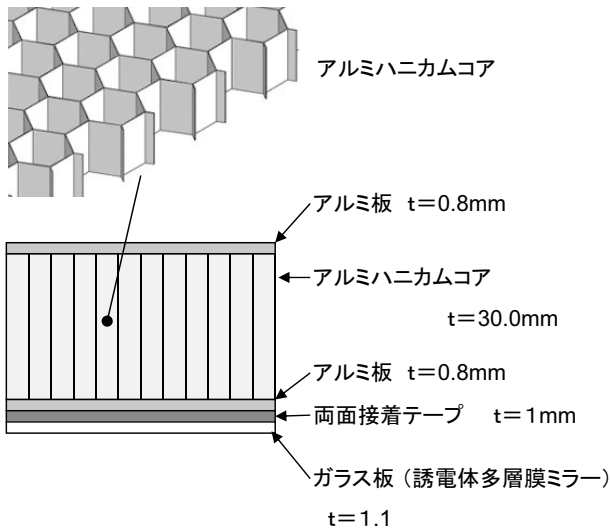


図15 中央反射鏡の構成。

の反射光が干渉し強め合うようにしたものである。

太陽光は広い波長域に分布するため、すべての光を反射させるためには層数は多くなる。誘電体各層は吸収がないので、反射しなかった光は透過し、誘電体多層膜ミラー自体が発熱して高温になることはない。基板ガラスの両面に計100層ほどの多層膜を設けた。その分光反射率の設計値を図14に示す⁴⁾。膜の応力による基板の反りを防ぐため、約1200nmの波長を境にして表面と裏面に反射機能を分割して、380nmから2500nmまでの波長帯で99%以上の反射率をもつ設計である。

誘電体多層膜ミラーは1.1mmのガラス板に形成したが、それだけでは強度が不足し、自重でたわむだけでなく破損が懸念される。しっかりした支持体に接着固定する必要がある。支持体には軽量で高剛性が得られるアルミハニカムパネルを採用した。図15に中央反射鏡の構成図を示す。

アルミハニカムパネルは軽量でかつ剛性が高く、自重や風抵抗で歪まず平面性を維持できる。このパネルへの誘電体多層膜ミラーの取り付けには、伸縮性があり耐熱温度が200°Cのアクリルフォームの両面テープを用いた。

4.3 耐光性の検証

このように構成した中央反射鏡が実際にどの程度の入射光密度に耐えるか、製作した反射鏡を用いてテストを行った。テストは大型のフレネルレンズを用い、太陽光を誘電体多層膜ミラーに集光させ裏面温度を赤外線カメラで測定した。集光倍率はフレネルレンズによるデフォーカスで調整した。実験の概念図を図16に、集光倍率とミラーの裏面温度の関係を図17に示す。

測定時の外気温は22°Cで、直達日射DNI (direct normal irradiance) は約0.7 kW/m²であった。ミラーの温度は各

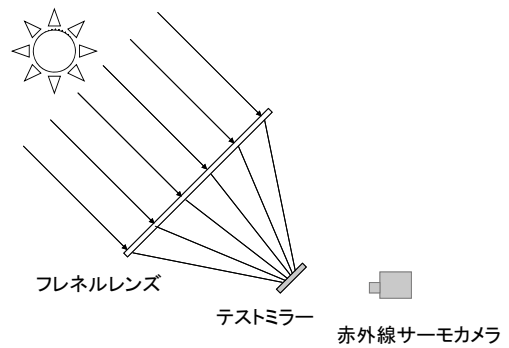


図16 耐光性評価実験概念図。

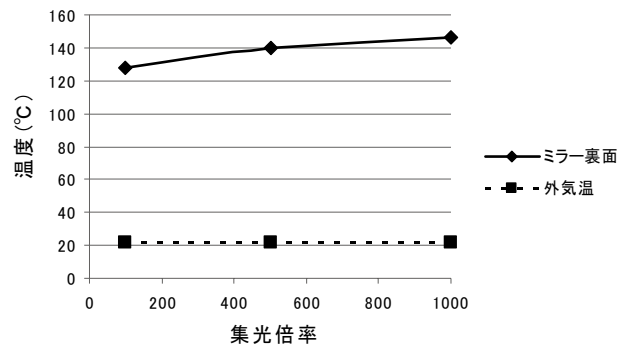


図17 集光倍率とミラー裏面の温度。

倍率の平衡状態のものである。1000倍集光すなわち入射光強度700 kW/m²でも150°C以下で温度上昇分は130度で、外気温が50°Cとしても接着剤の耐熱温度以下におさまる。また、この実験中、誘電体多層膜ミラーに変化はなく、中央反射鏡は大規模なプラントにも適用可能であることが実証された⁴⁾。

5. 集光光学系の評価

今回のビームダウン型集光光学系の実験装置は、図7の構成でレーザー上での集光性能評価を目的として製作された。レーザーにはセラミックの拡散反射板が置かれ、中央反射鏡の中央部に設置された観測用二次元色彩輝度計(コニカミノルタ製CA2000)で照度分布を計測した⁵⁾。実際に必要な値は放射照度分布であり、放射量への換算のために拡散板のところどころにガードン熱量計を配置し放射照度との相関係数を求めた。相関係数は時刻、すなわち太陽光のスペクトル分布により変化し、正確な測定のためには常時両方の値を測定し相関係数を求める必要がある⁶⁾。

集光実験は東工大とマサチューセッツ工科大学の研究チームでそれぞれ異なる季節に行われた。結果の一部を図18に掲載する⁵⁾。図18(a)の全ヘリオスタットによるスポットは、全体的な偏芯があるものの良好である。時刻変化でスポットにフレア増加がみられ、ヘリオスタット1台ずつの

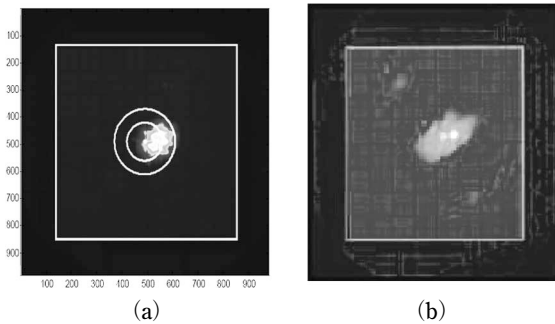


図18 集光スポット. (a) 全ヘリオスタット, (b) 集光不良ヘリオスタット.

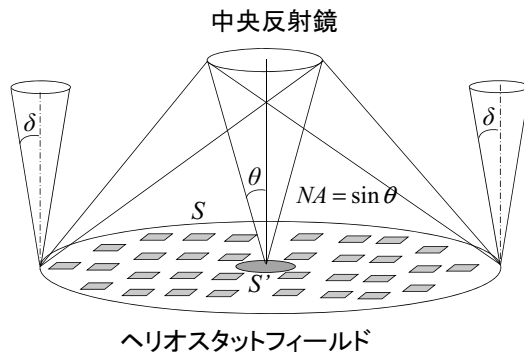


図19 集光倍率と中央反射鏡の大きさ.

スポット観察により、図18(b)のようにスポットが3つに分割されるものがあることを確認した。これは前述のギャングド式ヘリオスタットの取差の影響である。

集光実験装置は実験期間を通じて安定的に稼働し、ほぼ理論値との対応が得たが、一方でギャングド式ヘリオスタットの取差は集光性能に及ぼす影響が大きいことも確認した。Tボーン式との比較検討が今後の課題である。

6. ビームダウン型の課題

大型の実用光学系では高温を得るために集光倍率をできるだけ大きくしたい。このときビームダウン型システムはレイアウト上の課題に直面する。図19のようにヘリオスタットフィールドの面積を S として、集熱レシーバーの面積を S' 、集光ビームのNAを $\sin \theta$ とし、太陽の視野角を δ とすると、エタンデュー保存則より次式が得られ、

$$\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \delta} = \frac{S}{S'} = M \quad (1)$$

この式より、ヘリオスタットフィールドを広げ、集光倍率 M を大きくするには、光学系のNA、すなわち θ を大きくする必要があることがわかる。しかし、 θ が大きくなると中央反射鏡は大きくなり、コストアップや空気抵抗に対する脚の強度など構造的な問題が顕著になる。中央反射鏡とレシーバーとの距離を短くすれば、同じ θ でも径は小さくなる。つまり中央反射鏡の高さを低くするか、レシーバー位置を上昇させるとよいが、レシーバーを上昇させるとタワー型に対するメリットを失ってしまう。コストと集光性能のバランスを考えた設計の最適化が必須である。

集光太陽熱発電は欧米が主体となり開発され、大型の発電プラントが建設されるようになったが、技術的には1984年にトラフ型の実用プラントが建設されて以降あまり進展はなく、最近ようやくタワー型の溶融塩システムが稼働した。初期投資が大きいことからリスクのある新規技術が試されにくい保守的な業界である。一方で太陽電池の技術開発は華々しく、化合物型の高効率電池や低コストのシリコン太陽電池が出現し、太陽エネルギー利用の観点では太陽電池の躍進が著しい。しかし、CSPは従来の火力発電との相性がよく、24時間稼働する基幹発電所になり得るシステムであり、今後の技術革新を期待したい。日本の技術力はこの分野でも大いに力を発揮すると考える。

文 献

- 1) S. A. Kalogirou: *Solar Energy Engineering* (Academic Press, 2009) pp. 135-149.
- 2) D. R. Mills and G. L. Morrison: "Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants," *Sol. Energy*, **68** (2000) 263-283.
- 3) Y. Tamaura, H. Kaneko and H. Hasuike: "Demonstration experiment on 100 kW pilot plant of Tokyo Tech Beam-Down Solar Concentration System," *SolarPACES 2010*.
- 4) 森 伸芳, 石原英之, 石田和夫: "集光太陽熱発電用特殊反射鏡", *Konica Minolta Technology Report*, **9** (2012) 9-14.
- 5) M. Mokhtar, I. Rubalcaba, S. Meyers, A. Qadir, P. Armstrong and M. Chiesa: "Heliostat field efficiency test of beam down CSP pilot plant experimental result," *SolarPACES 2010*.
- 6) S. A. Meyers, A. Qadir, I. Rubalcaba, M. Mokhtar, M. Chiesa and P. Armstrong: "Development of a correlation between luminous intensity and solar flux for the beam down tower configuration," *SolarPACES 2010*.

(2012年1月11日受理)