

# 集光太陽熱発電用特殊反射鏡

Advanced Mirrors for Concentrated Solar Thermal Power Systems

森 伸 芳\* 石 原 英 之\* 石 田 一 夫\*  
Nobuyoshi MORI Hideyuki ISHIHARA Kazuo ISHIDA

## 要旨

地球温暖化問題、エネルギー資源の有限性の視点から、再生可能エネルギーへの期待が高まる中、太陽電池と並ぶ最有力候補として集光太陽熱発電はアメリカ、スペインを中心に精力的に開発されてきた。集光太陽熱発電は鏡で集めた太陽光を熱として用い、通常の発電装置を駆動するものである。その新方式であるビームダウン型は、2次鏡としての中央反射鏡が技術のボトルネックと考えられてきたが、コニカミノルタは誘電体多層膜とアルミハニカム板を用いたソリューションを提案した。誘電体多層膜ミラーは高反射率を有し、かつ吸収がなく、理論的には大規模プラントで必須となる高密度集光状態でも使用可能である。製作された反射鏡は灼熱の砂漠などの過酷な環境や高密度集光状態を想定した評価試験を突破した。2009年夏にテストプラントへの搭載に至り、以降さまざまな実験で使用されている。

## Abstract

Today, global warming and finite energy resources pose a critical need for renewable energy. In response, CSP (concentrated solar power) systems are being intensively developed, chiefly by the USA and Spain. CSP systems use solar light collected by mirrors to produce heat for common power-generating equipment. The beam-down type CSP system uses an elevated central reflector as a secondary reflector to concentrate light. The design of the mirrors comprising this central reflector presented a bottleneck, but Konica Minolta solved this using a dielectric multi-layered mirror and aluminum honeycomb panel. These mirrors have extremely high reflectance and virtually no light absorption, excellent for handling the high-density light essential to large-scale plants. The mirrors were evaluated under severe environmental conditions, such as scorching desert heat and states of high-density concentrated light, and they passed all evaluations. The central reflector was installed in a test plant in summer, 2009, in Abu Dhabi, and has been used in various experiments.

\*コニカミノルタオプト(株)  
技術開発本部

## 1 はじめに

地球温暖化は今や文明化した人類の直面する最大の危機であり、温室効果ガスの削減は必須の課題となった。そのため脱化石エネルギーが求められているが、持続可能エネルギーという視点からも喫緊の課題である。化石燃料の埋蔵量は現在の使用量から推計すると後50年から150年といわれている。人口の増加と途上国の発展に伴うエネルギー需要の高騰を考慮すると、さらに短くなると懸念される。Fig. 1はドイツの地球環境変動諮問委員会(WBGU)の試算で、増え続ける全世界のエネルギー需要を賄い、かつ大気中のCO<sub>2</sub>濃度を450ppm以下に保つためのエネルギー資源の使用配分を示している<sup>1)</sup>。化石エネルギーの使用はある時点から漸減させ、需要の伸びに答えるのは、風力、太陽光、バイオマス、地熱などの自然エネルギーとすべきとの試算である。先進国が最も期待する原子力はウランの埋蔵量や大量の核廃棄物を考えると持続可能エネルギーとは言いがたい。今後の人類の発展を維持していくためには、環境にやさしい持続可能エネルギーの開発は必須である。

新エネルギーの有力な候補のひとつに太陽光利用がある。太陽電池パネルは大幅な価格低減がなされ、大規模な発電プラントの計画も多い。しかし、太陽光発電も低コストの蓄電技術が開発されない限り、火力発電所の代替とはなり得ない。事実、多くの太陽電池が稼働する地域では瞬間的な電圧低下による停電問題が懸念され始めている。

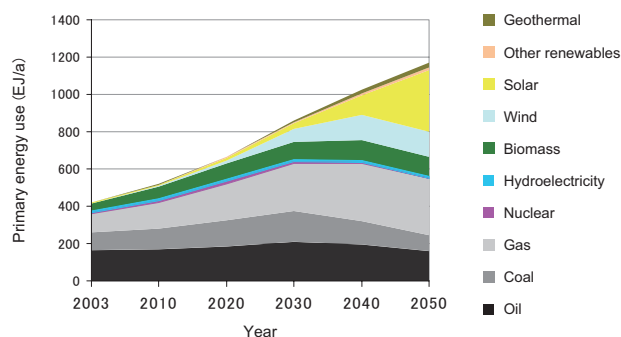


Fig. 1 Transforming the global energy mix: the exemplary path until 2050. Source: WBGU (2003)

このような状況で世界では太陽熱発電が火力発電に変わる新エネルギーとして注目され多くの実験プラントや商用プラントの建設が計画されている。

本稿では、アブダビに建設されたビームダウン型集光太陽熱発電の実験装置に提供した中央反射鏡についての技術紹介を行う。

## 2 集光太陽熱発電

### 2.1 集光太陽熱発電の原理

集光太陽熱発電は Fig. 2 のように反射鏡により太陽光を集め、これを火力発電や原子力発電と同様に熱として利用し、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溶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。

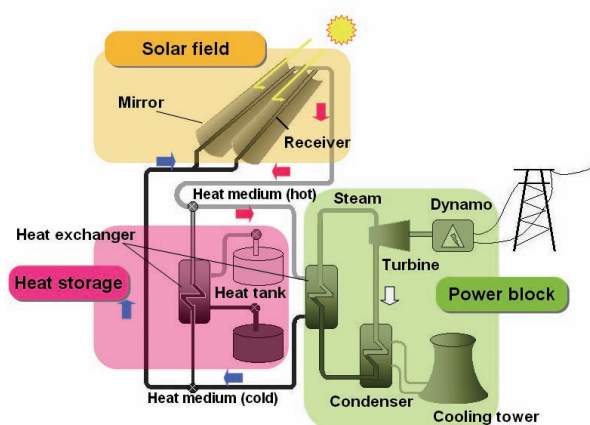


Fig. 2 CSP power plant with thermal storage.

### 2.2 従来の集光光学系

Fig. 3 に現在使用されている太陽光の集光方式をまとめた。最も普及しているのがトラフ型システムであり、これは写真のように断面が放物線のシリンドリカル状の反射鏡により太陽光をその焦点位置に配置されたパイプ状集熱装置（レシーバー）に集めるものである。パイプ中に油などの熱媒体を循環させて熱を回収する。

トラフ型システムでは太陽の日周運動に対し南北の軸に対する回転で追尾するだけで太陽高度に関わらずレシーバー線上のどこかに集光でき、装置は簡単である。しかし集光は2次元的で倍率が低いため、高熱を得にくく熱効率も低い。

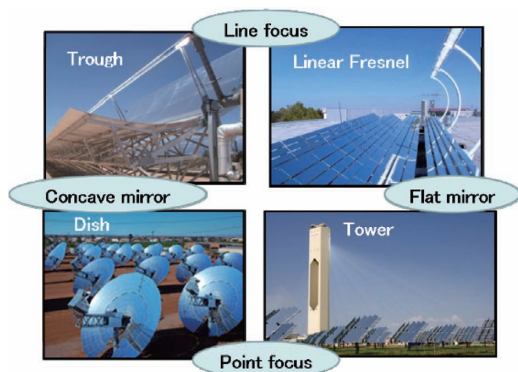


Fig. 3 Conventional concentration optics for CSP systems.

これに対し、より高効率のシステムとして提案されているのがタワー型システムである。これは表中の写真に示すように地上に配置されたヘリオスタットと呼ばれる太陽を追尾する反射鏡によりタワー頂上部に置かれたレシーバーに光を集めるものである。3次元的に集光することにより集光倍率が高く、高温を得ることができるので熱効率が良い。また、蓄熱材として融点が高く比熱の大きい溶融塩を使うことができる。溶融塩に蓄えられた熱は保温タンクに貯めると夜間の発電も可能となる。追尾のための機構は複雑になるがヘリオスタットに用いられる反射鏡は平面鏡でもよく、コスト低減を期待できる。

## 3 ビームダウン型集光光学系

### 3.1 ビームダウン型集光光学系

タワー型のシステムは、溶融塩をタワー頂上のレシーバーに送り、熱を回収し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り、また集熱レシーバーが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、Fig. 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2次反射鏡で反射し地上に置かれたレシーバーに集める。ビームダウン型では、放熱を防げるキャビティ型レシーバーを使いやすく、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。

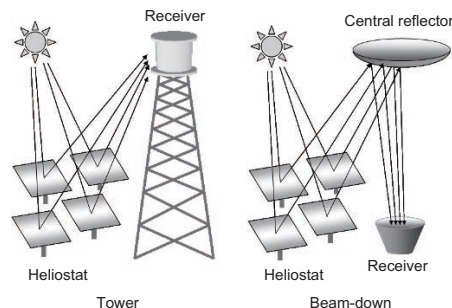


Fig. 4 Tower and beam-down CSP systems.

### 3.2 マルチリング式ビームダウン

東工大は、ビームダウン型を改良し中央反射鏡を輪帯状のマルチリング式（フレネル式）とし空気抵抗を低減することを提案し、アブダビで100kWの集光実験装置が建設された<sup>2)</sup>。Photo. 1 に完成した集光実験装置を示す。

高さ16mの位置に取り付けられた直径9mの中央反射鏡は3つのリングからなり、それぞれのリングは1m角程度の台形の平面鏡を組み合わせてできている。Fig. 5 に示すように各平面鏡は地上に配置されたヘリオスタットと1対1対応になっており、ヘリオスタットからの収束光を地上のレシーバーに向けて反射し、レシーバー上でスポットを作る。ビームダウン型では中央反射鏡に全てのヘリオスタットからの光が入射することになる。この実験装置では、中央反射鏡に入射する太陽光強度はヘリ

オスタットに入射する太陽光強度の約40倍である。実用プラントでは、光学系の規模は大きく、集光倍率も高くなり熱や素材の紫外線による劣化が課題となるほか、反射鏡の剛性と面精度および重量が課題となってくる。したがって中央反射鏡はビームダウン型集光システムの鍵を握るといえる。

## 4 中央反射鏡の設計

### 4.1 中央反射鏡の課題

実用プラントの中央反射鏡では、50倍以上の強度の太陽光が入射するので、吸収があると発熱し高温になる。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800nm以上の近赤外の吸収で反射率は低下し、300nmから2500nmに分布する太陽光スペクトルの加重平均では15%程度の吸収がある。直達太陽放射強度(DNI)が $1\text{ kW/m}^2$ で、その50倍が一様に入射するとき、発熱量は $7.5\text{ kW/m}^2$ となり、反射鏡の温度は $280^\circ\text{C}$ と見積られる。(外気温 $50^\circ\text{C}$ で水平板下面の対流伝熱を仮定した。)実際には1枚の鏡内でも入射光強度にはムラがあるため、最高温度は部分的に $300^\circ\text{C}$ を超えると推定される。

反射率を高めるために銀の増反射鏡を用いると3%の吸収により発熱は $1.5\text{ kW/m}^2$ となり、ミラーの温度は $130^\circ\text{C}$ となるが、長期間高温にさらされるとバックコートが劣化し、銀の腐食やマイグレーションが懸念される。

反射鏡の保持にも課題がある。ヘリオスタット用反射鏡は裏面に何本かの足を接着し、これによりフレームに取り付けられる。同様の方法で中央反射鏡を取り付けると下向きゆえに接着面には常に引き剥がす荷重がかかり、さらに上述のように熱衝撃が加わることになる。

### 4.2 中央反射鏡へのソリューション

これらの課題に対し、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、反射鏡の耐久性や保持方法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Fig. 6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の反射光が干渉し強め合うようにしたものである。



Photo 1 100 kW beam-down CSP installation in Abu Dhabi.

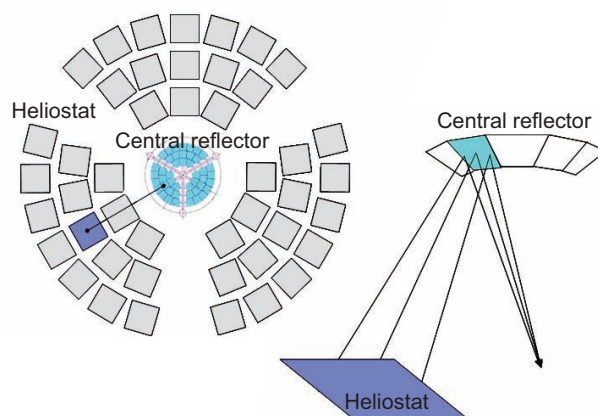


Fig. 5 Layouts of heliostats and central reflector.

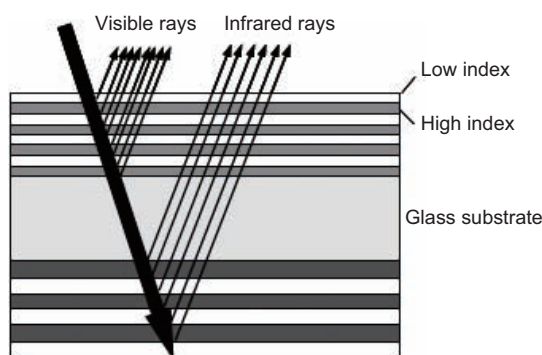


Fig. 6 Schematic of a dielectric multi-layered mirror. The top and bottom reflect visible rays and infra-red rays respectively.

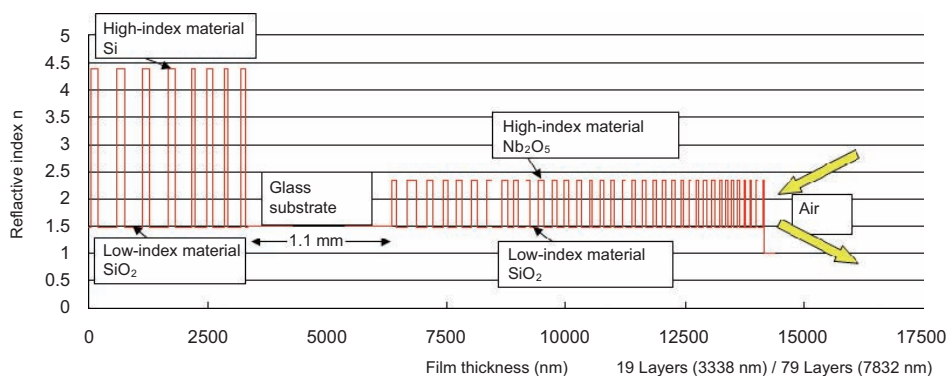


Fig. 7 Layer constitution of dielectric multi-layered mirror.

太陽光は広い波長域に分布するため、全ての光を反射させるためには層数は多くなるが、層数が不足する場合でも誘電体各層は吸収がないので、反射しなかった光は透過する。そのため多層膜ミラー自体が発熱して高温になることはない。Fig. 7 に多層膜ミラーの層構成を示す<sup>3)</sup>。

厚さ1.1 mmの透過率の高い基板ガラスの両面に合計で100層ほどの多層膜を設けた。Fig. 7の右側が入射面側でほぼ可視光域を反射する層が形成され、基板ガラスの裏面に高屈折率材料を用いた赤外域の反射層を設けている。分光反射率の設計値をFig. 8に示す<sup>3)</sup>。約1200 nmを境にして表面と裏面に反射機能を分割して、380 nmから2500 nmまでの波長帯で99%以上の反射率をもつ設計である。

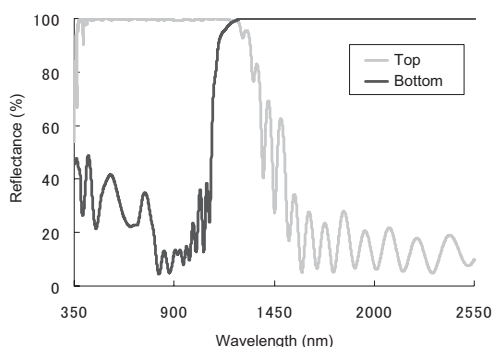


Fig. 8 Reflectance (design values).

次に反射鏡の保持方法について述べる。誘電体多層膜ミラーは1.1 mmのガラス板に形成されるが、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の可能性もある。中央反射鏡は平面性も要求されているので、しっかりした支持体に接着固定することにした。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。Fig. 9に中央反射鏡の構成図を示す<sup>4)</sup>。

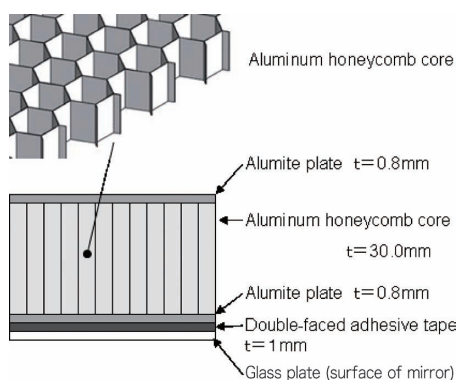


Fig. 9 Structure of a central reflector mirror.

フレームへの反射鏡の取り付けは、アルマイト板にネジを切ったSUS製の台座を設け、それを介して行う。Photo. 2に裏から見た支持体を示す。ほぼ1 m角の台形で、台座の間隔は800 mmである。重量は誘電体多層膜を施したガラス板を含めて13 kgである。アルミハニカムパネルは軽量でかつ剛性が高く、この構造では200 kg

重の荷重がかかっても変形は1 mm以下となる。これは風速50 m/秒に相当する荷重である。

もしガラスの反射鏡の裏面に同様の配置で足を取り付けるとすると、自重による変形が1 mm以下となるためにはガラス板は5 mm以上の厚さが必要で、風速20 m/秒の風圧力30 kg重/m<sup>2</sup>が加わる場合でも歪みを1 mm以下にとどめるには7.5 mm以上が必要になる。このとき重量は台座を除くガラス板だけで18 kg以上になる。

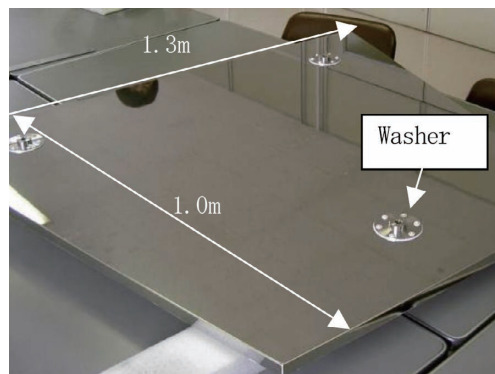


Photo 2 Mirror constructed of honeycombed aluminum.

アルミハニカム支持体へのガラス板の取り付けにはFig. 9に示すように伸縮性のあるアクリルフォームの両面テープを用いた。高温下での接着力低下も考慮して選定をおこない、耐熱温度も200°Cである。誘電体多層膜を用いた反射鏡は設計的には吸収は0だが、表面の汚れを想定し3%の吸収発熱を仮定したシミュレーションを行った。環境温度50°Cの無風状態(熱によるゆるやかな空気のみ)で太陽放射1 kW/m<sup>2</sup>の50倍が入射する際の反射鏡の温度は130°Cと予想され、耐熱性は十分である。しかし大規模な実用プラントになると設計によっては太陽光の数百倍が入射する可能性もあり、誘電体多層膜ミラーの製造誤差を含めテストが必要である。

## 5 中央反射鏡の評価

### 5.1 反射率

ほぼ1 m角の大型の反射鏡であるため、面内での反射率のばらつきが懸念され、製膜装置の構成からFig. 10に示すように上下方向10ヶ所で分光反射率を測定した。10ヶ所の測定値の平均値をTable 1に示した。平均反射率は単純平均と太陽光スペクトルによる加重平均の2種で求めてある。いずれも96%以上でばらつきも少ない。

また、代表的な分光反射率の測定結果をFig. 11に示す。誘電体多層膜は角度依存性があるので、18°、23°、30°の入射角について測定している。またエアマス1.5での太陽光スペクトルも同じグラフ内に表記した。

設計反射率に対し、製作された反射鏡の測定値は、97%程度となった。低下の主原因は層厚誤差で、ところどころに反射率が急落する鋭い谷がある。また各層のコンタミによる散乱も原因のひとつである。

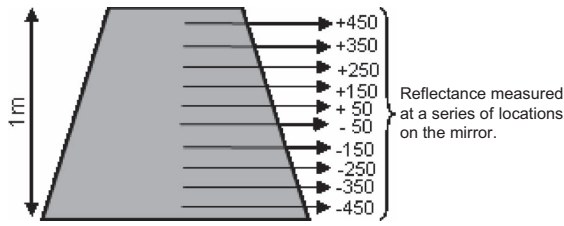


Fig. 10 Measured position for reflectance.

Table 1 Average reflectance at a series of locations.

Position in the substrate (mm)	400 – 2,500 nm average reflectance			400 – 2,500 nm solar spectrum weighted average reflectance		
	Incident angle			Incident angle		
	30°	23°	18°	30°	23°	18°
450	96.7	97.0	96.7	96.7	96.8	96.7
350	97.1	97.1	96.7	97.1	97.2	97.0
250	97.2	97.3	97.2	97.1	97.1	97.1
150	97.2	97.3	97.3	97.2	97.2	97.2
50	97.4	97.1	97.2	97.5	97.3	97.4
-50	97.3	97.6	97.6	97.4	97.4	97.4
-150	97.0	97.5	97.2	97.4	97.6	97.4
-250	97.5	97.5	97.4	97.6	97.7	97.6
-350	97.0	97.1	96.9	97.4	97.5	97.3
-450	97.0	97.4	96.8	97.3	97.5	97.3

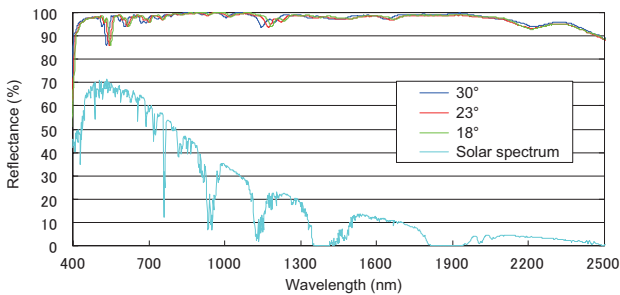


Fig. 11 Spectral reflectance of a dielectric multi-layered mirror.

## 5.2 高密度入射光に対する耐性

次に誘電体多層膜ミラーを保持する接着層は大規模プラントを想定して、どの位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に貼ったテープに黒体スプレーを塗装し、赤外線カメラで撮影し温度を測定した。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Fig. 12に、集光倍率とミラーの裏面温度の関係をFig. 13に示す。

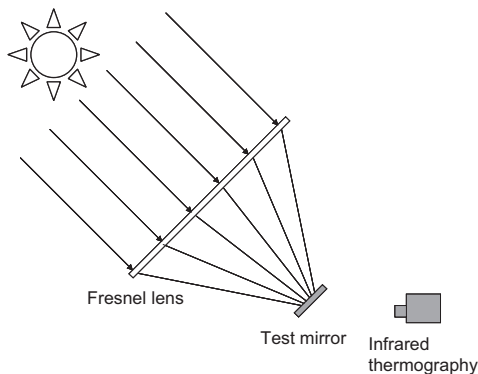


Fig. 12 Layout of high-flux test with infrared thermography by which the temperature of the test mirror was measured.

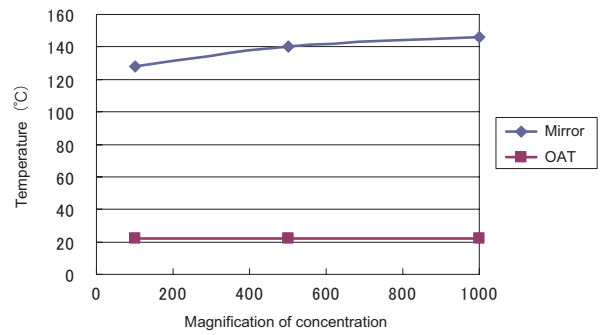


Fig. 13 Backside temperature of mirror vs. magnification of flux. Even under 1,000 x high flux, the temperature of the mirror remained under 200 °C, the temperature below which the adhesive in the mirror can bear heat. (OAT: outside air temperature)

測定時の外気温は22°Cで、DNIは約0.7kW/m<sup>2</sup>で、ミラーの温度は各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700kW/m<sup>2</sup>でも150°C以下で温度上昇分は130度であった。外気温が50°Cでも接着剤の耐熱温度200°C以下におさまると推定される。この結果、この構成の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判った。

## 5.3 湿熱試験・熱衝撃試験

今回、中央反射鏡は夏には気温が50°Cを超え、夜間には湿度も高い中東の湾岸部で使用されるのでPhoto. 3に示す大型の恒温槽を用いた加速試験を行った。まず、75°C、65%環境下で反射面を下向きにした配置で2週間放置したが、変化なく。その後、室温から120°Cの間の温度サイクルを15サイクル実施したが、やはり変化は見られなかった。ここで、温度サイクルは1時間あたり40度で変化させた。



Photo 3 Heat/humidity and thermal shock tests were conducted in a large thermostatic chamber.

## 5.4 平面性

中央反射鏡はヘリオスタットからの集光する光を反射する平面鏡として設計されている。その平面性が損なわれているとレシーバー上で光は広がってしまう。平面性の誤差は4mrad以内、したがって、標準偏差σで1mrad (RMS) 以下となる必要がある。通常の光学系の測定に用いる干渉計では、1m角の被検物は大きすぎて全体を測定することができず、大型被験物用の接触式の3次元測定器では、測定精度が不足する。そこで、Fig. 14に示す測定システムを構築して平面性を測った。

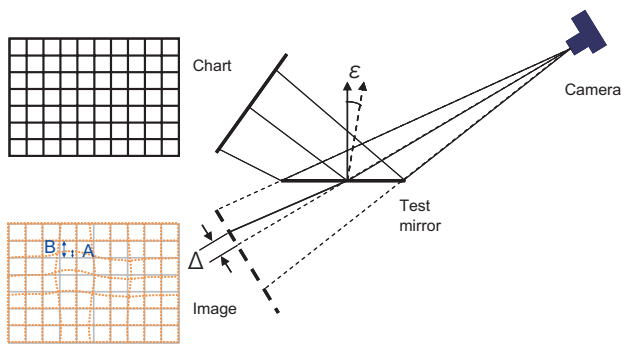


Fig. 14 Mirror flatness measurement system. Flatness error is obtained from the deformation of the image of the chart.

このシステムは、反射鏡は平面性のよいガラス板を用いられていることを考慮し、小さなピッチでの凹凸は無視して、支持体の面精度や接着精度、自重変形など大きなピッチでの精度のみ測ればよいという方針で考案された。小さなピッチの凹凸が問題になるときは、接触式の面粗さ計などが使える。

正確に描かれた大きな格子状のチャートの反射鏡による像を計測カメラ（キーエンス製 CV-5000）で撮影し、取り込んだ画像からエッジ検出して、格子像の歪み  $\Delta$  を算出、これから鏡の法線の誤差  $\epsilon$  を求める。サンプリング間隔は被検反射鏡の表面上 5cm 程度で、これより細かい周期で変動する面の凹凸は原理的に測定できないが、上述のように問題ない。また被検反射鏡とチャートの距離を大きくすると反射鏡の誤差が像に及ぼす影響が大きくなり、高感度で面精度を測定できる。

この構成では、カメラが反射像に正対していないとチャートの像にアオリによる台形歪が発生するが、計算により除去し反射鏡の凹凸によって発生する誤差のみを抽出する台形誤差補正機能を持たせた。その結果、測定時の配置はおおまかで良く、測定ばらつきを抑制できる。また測定システムはチャートとカメラのみで構成されているので、チャートが保持できれば屋外での測定も可能である。

Photo. 4 に計測カメラに取り込んだチャートの反射像を示す。右下と左下で、格子の横線がわずかに曲がって見えているが、これが反射鏡の凹凸の影響である。この反射鏡の面精度は 0.47 mrad RMS で十分な平面性を有している。今回製作した予備を含めて全 52 台の中央反射鏡ユニットは全て 1 mrad RMS 以下であった。

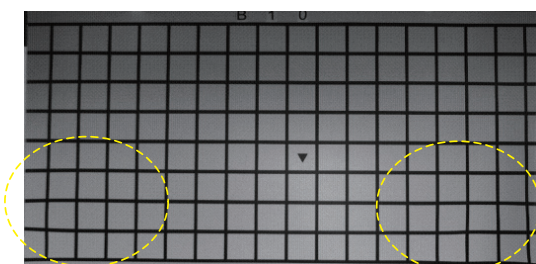


Photo 4 Chart image from tested mirror. Circles surround slight deformations visible in the image.

## 5.5 表面硬度

中東の砂漠では強風とともに砂嵐に対する対策が必要である。特に退避姿勢をとれない中央反射鏡は十分な表面硬度を持っている必要がある。誘電体多層膜は  $\text{SiO}_2$  や酸化ニオブのような無機酸化物をスパッタリングにより製膜しており、銀層に比べ表面硬度は十分との予測があったが、ビッカース硬度は基材のガラスと同等以上の 558 であることを確認した。また詳細は割愛するが、砂嵐を模したサンドブラスト試験も行ないガラス同等の耐久性を確認した。

## 5.6 実地試験

このようにして製作、検査された中央反射鏡は 2009 年 7 月にアブダビ空港近隣のマスターシティの一角につくられた試験装置の全 45 枚に搭載された。以降、東工大による集光試験をはじめ、集光太陽熱発電の実験施設として利用されて、2 年が経過している。

Photo. 1 は全ヘリオスタットによる集光実験の様相である。一部の中央反射鏡がエメラルド色の干渉色が見られる。（白く見えているものは近くの建物の屋根である）この光は指向性があり、多層膜層内のコンタミで散乱された光が干渉したものと推定される。実験室の評価では入射光が弱いと検出できなかった。

## 6 結論と今後の課題

今回のプロジェクトではビームダウンによる集光分布と集光量の季節ごとのデータを取得し、その目的を達し、装置は引き続きレーザーの開発に利用されている。供給した誘電体多層膜とハニカムを用いた中央反射鏡は、十分な性能と耐久性を備え、より大規模なシステムにも応用可能なものであることが実証された。

ビームダウン型システムはタワー型に比べ中央反射鏡やその脚部などのコストが高むことが課題である。また大規模なシステムで中央反射鏡の設置高度が上がった際のミラー面洗浄方法も今後解決すべき課題である。

コニカミノルタは今回のプロジェクトに中央反射鏡の供給という形で参加したが、実地での多くの知見を得ることができた。これを糧に、今後さらに重要性を増す集光太陽熱発電に有用なコンポーネントを提供することで寄与して行きたい。

### ●参考文献

- 1) Towards sustainable energy systems, German Advisory Council on Global Change, 2003
- 2) Y.Tamura et al.: "Demonstration Experiment on 100kW Pilot Plant of Tokyo Tech Beam-Down Concentration System", abstract for SolarPACES2010, Perpignan
- 3) 森伸芳, 玉浦裕. 太陽光集光型熱発電システム, MICROOPTICS NEWS.2009, Vol.27, No.4, PP19-24
- 4) WO 2010-4954