

衛星搭載光学システムのレンズ設計

武 山 芸 英

The Integrated Design Approach of the Lens-Based Space Optical Systems

Norihide TAKEYAMA

A design condition required for the optical systems in the space-based solar telescope is more stringent than those for no-solar and ground-based missions. Additional consideration includes the opto-thermal property, radiation resistance and vibration environment during the launch. Solar optical telescope (SOT) aboard Solar-B (“Hinode”) satellite is a diffraction-limited telescope. We designed the collimator lens unit (CLU) of SOT, which fed the collimated light from the telescope. In this article, the design process to select the combination of glass materials is presented with the opto-thermal aberration and the radiation resistance. We introduce an integrated simulation process to solve mechanical-thermal problem by taking into account the refractive index distribution, stress distribution, surface deformation of the lenses and artificial polarization error. The simulation is performed by employing the combination of the optical illumination analysis and FEM (finite element method) analysis. The in-orbit performance of CLU was excellent, and has been working for more than 5 years.

Key words: lens design, athermal, apochromat, space telescope, satellite

宇宙軌道に展開する人工の飛翔体の多くが、紫外・可視・赤外領域の電磁波を情報源とするセンサー、いわゆる光学センサーを搭載している。それらのなかでも、2006年9月、鹿児島の内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた太陽観測衛星「ひので (SOLAR-B)」は、特に宇宙に特有の環境を緻密に反映した光学センサーを搭載した衛星として知られている。この衛星には3つの観測装置が搭載されており、それぞれ可視光磁場望遠鏡 (solar optical telescope; SOT)¹⁾、X線望遠鏡 (X-ray telescope; XRT)、極紫外 (EUV) 撮像分光装置 (EUV imaging spectrometer; EIS) とよばれている。

このうち SOT は、種々の原子輝線の分光偏光撮像を行うことによって、温度 6000 K の光球面から数万 K の彩層までの領域における磁場・温度・プラズマの流れを高い分解能で観測することを目的に開発された光学望遠鏡である。SOT はグレゴリアン型の反射望遠鏡と、この望遠鏡が形成した像をコリメートして後段に送り出す collimator lens unit (CLU) から構成される optical telescope assembly

(OTA) と、OTA から導かれた光束を取り込んで分光あるいは撮像する観測機器群から構成されている。OTA の主鏡がつくる像位置には、観測視野外の太陽像を鏡筒に導くことで太陽からの強烈な光エネルギーが後置光学部品における発熱要因となることを防ぐ斜鏡 (排熱鏡) が配置されている。排熱鏡の中央には観測視野に対応する像を凹面副鏡に導くための中央穴が空いていて、ここを通過した光束によって、最終的に主鏡近傍にグレゴリアン像が形成される。この像が CLU によってコリメートされることで、OTA は1台のアフォーカルな望遠鏡システムとして成立している (図 1)。OTA に求められる基本的な要請事項として、広い視野および広い波長範囲にわたって単色収差および色収差が十分に抑制されているという一般的な「静的要求」に加え、光学系が運用される環境の温度変化に抗した性能安定性 (短時間安定性)、および耐放射線特性 (長時間安定性) を確保するという条件が挙げられる。さらに磁場観測、すなわち偏光観測に影響を与えない程度まで人為偏光の発生を抑制するという制約がこれに加わる。CLU

(株)ジェネシア (〒181-0013 三鷹市下連雀 3-38-4-601) E-mail: takeyn@genesia.co.jp

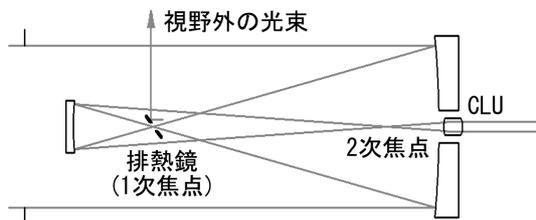


図1 Solar-B (ひので衛星) /OTA の構成.

はこれらの諸条件を、打ち上げ時の振動や衝撃に耐える構造とともに達成しなくてはならない。本稿では OTA を題材として、これら宇宙空間特有の条件について考慮した衛星搭載用望遠鏡のレンズ設計について紹介する。

1. コリメーター・レンズ・ユニット (CLU) の仕様

SOTの全長は、ランチャーである M-V ロケットのノーズフェアリングに格納できるように設定された。また、光検出器のピクセルサイズと画素数、サイエンスの要請から望遠鏡の焦点距離と視野が設定された。OTA は、視野外の太陽エネルギーを望遠鏡外に排出するための斜鏡 (排熱鏡) を主鏡の焦面に配置するため、グレゴリアン配置が選択された。CLU の射出瞳径は、後段に配置された偏光素子の寸法制約から設定され、結果、CLU の焦点距離が確定した。それらの一覧を表1にまとめて示す。

光学レンズの設計とは、材料の選定と光学面の間隔、曲率半径を決定するという作業につぎる。ただし宇宙環境を前提とする場合には、光学的条件だけでなく、熱的・機械的な制約条件も多重に考慮して設計することになる。宇宙放射線への対処も必要である。それらの影響は特に光学材料の選定における困難となって現れる。CLU の設計にあたっては、宇宙環境に適合するレンズ材料を最初に選定す

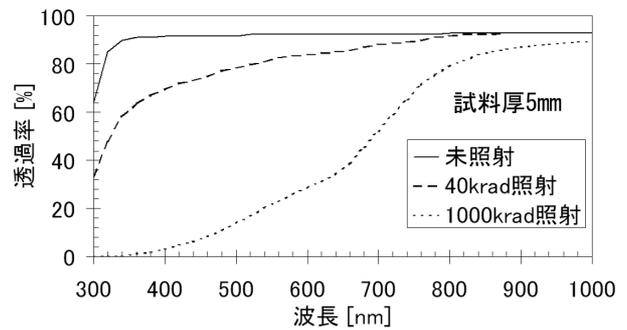


図2 分光透過率の γ 線照射量依存性. 通常グレードの BK7 (OHARA 社製 S-BSL7) の場合.

ることで、それら諸条件を光学的な設計制約に置き換え、その後、面間隔と曲率半径を決定するというプロセスをとることとした。

2. 耐放射線性を考慮した光学材料の選定

衛星搭載用望遠鏡のレンズ設計に特有の課題として、いかにして宇宙放射線への耐性を確保するかという問題がある。一般に、光学ガラスに宇宙放射線が照射されると、ガラスの分子配列の欠陥部に放射線照射によって生じた電子・正孔がトラップされ、とくに紫外から青色帯域に光吸収を生じるようになる。ブラウニングとよばれるこの現象は、トータルドーズが 10 krad 程度であっても顕著に表れる²⁾ (図2)。ブラウニングは石英ガラスでは生じないが、一般の光学ガラスであっても、溶解時に酸化セリウム (CeO_2) を添加することでガラス中に Ce^{+3} , Ce^{+4} イオンを導入すれば、それぞれ正孔トラップ、電子トラップ中心として機能するので、耐放射線特性をもたせることができる。しかし、そのことに由来する吸収帯が紫外域に生じることから、ベースとなるガラス材料にもよるが、一般的に

表1 OTA の仕様.

システム	項目	規定値
グレゴリアン望遠鏡	結像関係	無限共役 (物体距離・無限遠)
	構成	主副鏡からなるグレゴリアン光学系
	入射瞳径	$\phi 500 \text{ mm}$
	入射瞳位置	鏡筒開口部 (主鏡から 1700 mm 前方)
	合成焦点距離	4527.4 mm
	口径比	F9.05
コリメーター (CLU)	視野	$\phi 400$ 秒角 (像サイズ $\phi 18 \text{ mm}$ 相当)
	結像関係	無限共役 (平行光束を出射)
	射出瞳径	$\phi 30 \text{ mm}$
	焦点距離	271.6 mm
	波長範囲	668.4~388.3nm
	縮小側瞳位置	望遠鏡の射出瞳に適合させる
総合	環境温度	10~30°C (観測運用時)
	目標性能 (ストレール比)	0.98 (設計値として)
	空間分解能	0.2 秒角

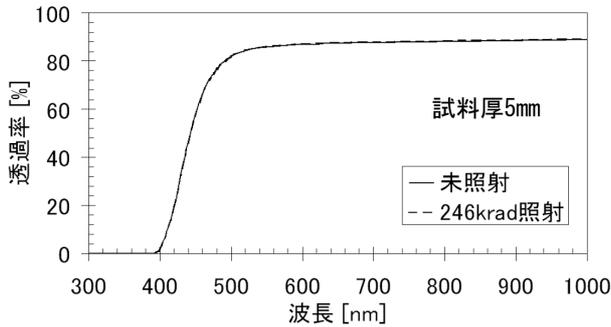


図3 分光透過率の γ 線照射量依存性. 耐放射線ガラスNB-SF1 (Sumita 社) の場合.

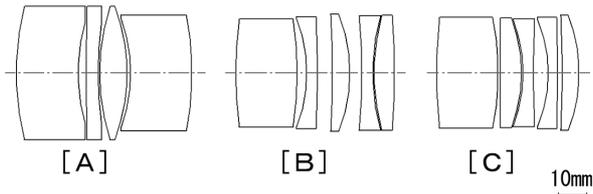


図4 アポクロマート・コリメーター. 設計解の変遷. [A] 熱収差考慮なし, [B] 熱収差を考慮した場合, [C] 光軸に沿った温度勾配を含む熱収差まで考慮した場合.

450 nm よりも短波長側を観測波長とする光学系には適さない (図3).

CLU の場合, 400 nm よりも短い波長帯においても高い透過率を実現する必要があったため, 耐放射線ガラスは採用できなかった. ただし, CLU が衛星構造の中心部に位置することから, CLU を取り囲む金属構体が放射線の遮蔽材として期待できることが定量的に確認された. これは, 必ずしも耐放射線ガラスを採用できなくとも, 屈折型光学系が成立することを意味している. しかしそれでも望遠鏡の開口前方については, 望遠鏡という装置の特徴として, 遮蔽効果を期待できる構造がない. そこで, CLU を構成するレンズ素子のうち, 最も望遠鏡の開口寄りのレンズ材料として石英ガラスを採用し, 後置光学材料に対する遮蔽効果の一助とした.

3. 色収差・温度収差の補正に適した光学材料の選定

予備的な設計の結果として, 石英ガラス (silica) にフッ化物ベースの低屈折率分散ガラス, シリカ系の光学ガラスを組み合わせた4枚構成レンズ (図4A) であれば, 所望の波長範囲にわたってザイデル収差も色収差も良好に抑制でき, 白色光に対するストレール比で表現して0.98以上という高い性能を視野全体にわたって達成できることを確認できた. しかしこの構成では, 焦点位置に甚大な温度依存性が存在する. フッ化物系のガラスは, いわゆるシリカ系ガラスと比較して屈折率の温度変化係数も線膨張係数も有意

に大きく, その補償が困難なためである.

予備設計解の場合, 結像位置の温度依存性は $32 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ にも達する. これは観測運用温度の全域では 0.64 mm に換算される. これではピントの再調整を行わない限り, CLU に要求されている回折限界性能を維持することはできず, 時間変化の激しい太陽活動領域への観測適用性に限界が生じることとなる. そこで改めて, 石英とシリカ系ガラス2枚からなる薄肉トリプレット光学系を前提として, 次の手順で大域的な材料探査を行った.

まず, アポクロマティズムについて考える. 薄肉トリプレット光学系の3波長色消し条件は, トリプレット光学系を構成する $i(=1, 2, 3)$ 番目のレンズの焦点距離 f_i , 分散 v_i , 部分分散 θ_i を用いて

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\theta_i}{f_i v_i} = 0 \quad (1)$$

と書けるので^{3,4)}, 各レンズの屈折力と分散の関係は系の合成焦点距離 f_λ^c を用いて

$$\frac{1}{f_1} = f_\lambda^c \cdot \frac{(\theta_2 - \theta_3)v_1}{A} \quad (2)$$

と表現できる. f_2, f_3 についても同様にサイクリックな形式で導ける. ここで,

$$A = (\theta_2 - \theta_3)v_1 + (\theta_3 - \theta_1)v_2 + (\theta_1 - \theta_2)v_3 \quad (3)$$

を用いた. また合成焦点距離の温度依存性は, レンズ材料の線膨張係数を α とするとき, 熱光学的膨張係数 OEC (opto-thermal expansion coefficient);

$$OEC = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \left(\alpha - \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} \right) \quad (4)$$

を導入することにより,

$$OEC_0 = \frac{1}{f_\lambda^c} \frac{df_\lambda^c}{dT} = \sum_{i=1}^3 f_\lambda^c p_i OEC_i \quad (5)$$

と表現できる. ここで, $p_i = 1/f_i$ は第 i レンズの屈折力である. また, アポクロマティズムの温度依存性は式 (2), 式 (3), 式 (4) を用いて次式で表せる.

$$\frac{d^2 p_\lambda^c}{dT d\lambda} = \sum_{i=1}^3 \frac{p_i}{v_i} \left(OEC_i + \frac{1}{v_i} \frac{dv_i}{dT} \right) \quad (6)$$

さて, 大域的なレンズ材料探査を実行するために, Schott 社および OHARA 社から入手可能な全 560 種類の光学材料から任意に選択した2種類と, 石英ガラスの組み合わせによって構成されるアポクロマティック・トリプレット, 総計 31 万通りのすべてに対して環境温度 20°C を前提に次に挙げる9個の量を計算し, おのおのに対する制約条件をすべて満足する組み合わせのみを抽出した後, OEC_0 の小さい順に並べ替えた一覧表を得た.

(1) 個別のレンズがそれぞれ小さな屈折率温度係数をも

つように、 $|dn/dT| < 8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

- (2) 個別のレンズがそれぞれ小さな線膨張係数をもつように、 $\text{CTE} < 2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
- (3) 各レンズのザイデル収差を小さく維持するための指標として、 $|\text{CRV}| < 14$ 。ただし、 $\text{CRV} = 1/R - 1/R'$ ； R および R' は各薄肉レンズの表裏面の曲率半径。
- (4) トリプレットレンズ全系として高い白色ストレール比を得るポテンシャルとして、3枚のレンズの $|\text{CRV}|$ の総和 < 25
- (5) トリプレットレンズ全系にわたる均質な温度変化に対して焦点距離の変動が小さく維持されるための指標として、 $|\text{OEC}_0| < 6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
- (6) トリプレットレンズの光軸に沿って温度分布が生じた場合でも焦点変動を小さく抑制するための指標として、 $|\text{OEC}_i| < 6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
- (7) 二次の色収差の温度依存性を小さく維持するための指標として、 $|d^2 f_{\lambda}^c / dT d\lambda| < 4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- (8) 広い波長帯域にわたって高いストレール比を実現するための指標として、 $|\text{高次の色収差}| < 1.5 \times 10^{-4}$ 。ここで、高次の色収差とは、アポクロマティズムを実現した3つの波長の中間波長における色収差量である。
- (9) 広い波長帯域にわたって、高いストレール比を実現するための指標として、トリプレットを構成する3枚のレンズそれぞれについて、内部透過率 $> 80\%$ 。ただし、各レンズの厚さを10 mmと仮定。

一連の制約条件の評価にあたっては、現実のCLUが真空環境下で運用されることを考慮して、真空中における屈折率(絶対屈折率)を用いた、CLUのように高度に色収差の補正を要求される光学系の場合には、このようにして空気の屈折率および屈折率分散の影響を排除することがきわめて重要である。

4. 厚肉レンズ系としてのCLU設計

前述の制約条件を満たしたガラスの組み合わせを前提に、CLUとして所望の焦点距離271.6 mmをもつ3枚構成の厚肉コリメーターレンズを設計した後、レンズ素子間がアルミニウム製のスペーサーで保持された状態を想定して、焦点距離 f の温度依存性 df/dT を評価したところ、それが顕著に小さな解を複数得た。それらのうち、高次色収差と df/dT がそれぞれ逆符号で絶対値最小の解は、

Silica+KzFS1(Shott社)+BAM9(OHARA社)

$$df/dT = -8 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$$

Silica+KzFS1(Shott社)+FTL8(OHARA社)

$$df/dT = +5 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$$

の2組であった。

そこでOTAと組み合わせて、これらの2組のアポクロマティック解を統合した1本のCLUを構成し、その射出瞳面にCLUと同じ焦点距離をもつ仮想的な無収差レンズを配置したところ、1階高次の色収差まで補正された4色色消しレンズであって、かつ温度収差の小さな解を導くことができた。この解の構成(図4B)は、

OTA — [Silica+KzFS1+BAM9+KzFS1+FTL8] — 後段
観測装置

と記述でき、次の性能を有することが確認できた。

系全体にわたる均一な温度変化に由来した像位置変化：
1 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$

20°C ± 10°C の温度変化に由来するプレートスケールの変化：0.006%

そのとき、像位置を固定したままで視野全域にわたる白色ストレール比：>0.97

しかしながら、OTAに近いレンズほど発熱量が大きいと仮定して、このレンズ系の光軸に沿って次のように温度分布を与えた場合には、

silica(30°C) + KzFS1(20°C) + BAM9(20°C) + KzFS1(10°C) + FTL8(10°C)

像位置の環境温度依存性：16.5 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$

ノミナルな像位置における白色ストレール比：~0.33
という水準まで性能が劣化してしまう。このような温度変化がどのような理由によって発生するかにかかわらず、CLUの光軸に沿った温度勾配が生じた場合にも像位置が安定して維持される設計解は見いだせないのか。この問題を解くために、隣り合うレンズの温度依存性が相互にキャンセルしあうよう、 OEC_i の絶対値が同じで逆符号となるよう、レンズ材料の配置順序を次の通りに入れ替えた。

[] 内の各数値は、 OEC_i を $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を単位に示したものである。

silica[-30]+FTL8[+54]+KzFS1[-12]+KzFS1[-12]
+BaM9[+18]

この配置(図4C)の場合、CLU全体が均一な温度環境に置かれるならば、

系全体にわたる均一な温度変化に由来した像位置変位：
1.3 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$

20°C ± 10°C の温度変化に由来するプレートスケールの変化：0.003%

そのとき、像位置を固定したままで視野全域にわたる白色ストレール比：>0.96

この配置で、CLUの軸に沿って次のように温度勾配が生じた場合は、

silica(30°C) + FTL8(20°C) + KzFS1(20°C) + KzFS1(10°C) + BaM9(10°C)

像位置の環境温度依存性： 3.4 μm/°C

ノミナルな像位置における白色ストレール比： >0.96

温度勾配を考慮しない解と比較して、5分の1程度まで像位置の環境温度依存性が鈍感になることがわかる。

このようにしてCLU単体としては、耐放射線特性、色収差、温度収差のいずれについても良好な特性を得ることができたが、CLUを透過して米国製である後段の観測装置に送られる光エネルギーがそれら観測装置を構成するレンズ材料によって吸収され、観測系全体としては温度収差を呈するということが、解析の結果明らかとなった。そこで、CLUにさらなる工夫を施して、後段への熱流入を抑制することとした。すなわち、CLUの第1レンズの入射側の面(CLU第1面)を凹面にし、その曲率中心をOTAのグレゴリアン像面に一致させた。その上でこの面に、赤外光を反射する膜を蒸着することで、観測に用いない赤外域の光束をOTAの内部でそのまま逆進させ、望遠鏡外に光エネルギーのまま排出することとした。その結果、後段観測装置での発熱は抑制されることとなった。ただし、この方法には、設計上注意すべき点がある。グレゴリアン像面と光検出器面とは原理的に光学的な共役関係にあるから、つまるところ、CLU第1面の曲率中心もまた、光検出器面と共役になるということである。したがって、いったん光検出器の表面に到達した光束のうち、その表面で反射した成分は、検出器面のコンフォーカル面であるCLU第1面に垂直入射して折り返され、再び光検出器面上に結像することになる。仮に光路上に存在する光学素子が完全に設計どおりに製造されればそれでも問題はないが、現実には製造公差が存在しているために、再帰光はノミナルな像の周辺でゴースト像を形成すると懸念される。このことの影響を回避・軽減することを意図して、再帰光が光検出器で十分に大きなぼけ像を形成し、その照度がノミナルな像照度と比較して無視できる程度に、CLU第1面の曲率中心とグレゴリアン焦点をずらすこととした。ただし、前述の薄肉レンズ解析の結果により、CLUの第1レンズは凸の屈折力をもたなければならないことから、これを2枚に分割し、CLU第1面が凹であるようなメニスカスレンズを先行素子として配置し、それに続いて本来の凸石英レンズを配置した。以上のプロセスを経て得た光学設計解について、さらに打ち上げ時の振動に耐えうるレンズ保持構造に適合するようなレンズ間距離やコバ厚に整えた結果、次の構成をもつ現

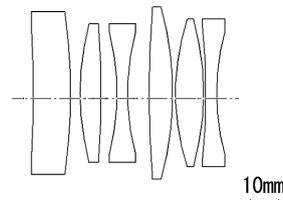


図5 レンズ保持および製造公差を考慮して得たCLU設計の最終解の断面。

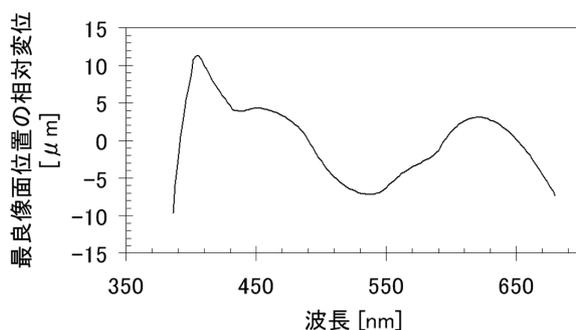


図6 CLU最終解がもつ最良像面位置の波長依存性。

実的なCLU設計解(図5)が導かれた。

OTA — [silica + silica + KzFS1 + BAM9 + FTL8 + KzFS1]
— 後段観測装置

波長に由来する最良像面位置の変化量： 光軸に沿って
21 μm (詳細は図6参照)

系全体にわたる均一な温度変化に由来した像位置変化：
1.35 μm/°C

20°C ± 10°C の温度変化に由来するプレートスケールの変化： 0.003%

そのとき像位置を固定したままで視野全域にわたる白色ストレール比： >0.97

5. 温度収差解析, 人為偏光解析

この改良解について、より緻密な方法で、熱光学効果とレンズ由来の人為偏光の効果を評価した。この評価においては、まず、紫外域から太陽スペクトルの影響を無視できるようになる5 μmまでの波長範囲にわたってレンズ材料の吸収係数(図7B)を実測し、その結果を使って太陽光がCLUに入射した際にCLUの各微小部位において発生する熱量を見積もった。具体的には、CLUの各レンズ素子を多層のレンズ構成に置き換え、さらに輪帯状の部位に分割し、加えて同径方向にも仮想的な境界を設けることで微小なセルからなる吸収帯の集合としてモデリングしなおした(図7A)。そこに太陽スペクトル(図7B)を反映した光束を入射させ、各セルの境界面を通過する光束を照明解析の手法を用いて定量化した(図7C)。その際レンズ表面の

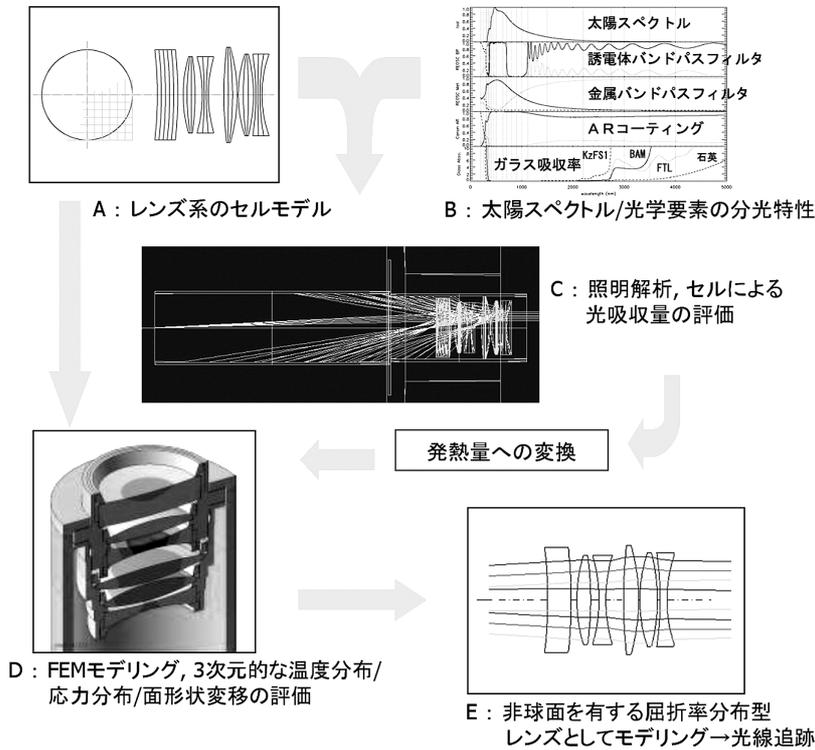


図7 詳細な熱解析のための評価シーケンス。

多重反射や、鏡筒内壁の反射光についても考慮した。各セルに入射する光束と射出する光束の差は、当該のセルで吸収された光エネルギーを表現していると考えられる。その大きさを当該セルにおける熱入力ととらえ、有限要素法を用いて CLU が熱平衡に達した状態における各部の温度と応力およびレンズ面形状の変化量を求めた (図 7D)。解析にあたっての温度境界条件は、レンズ鏡筒の衛星構体への取り付け面において定値 (10°C および 30°C) として与えた。

この解析から得たレンズ内部のローカルな温度 T_0 の分布と、各レンズ材の屈折率 n の温度依存性 dn/dT を使って、CLU のレンズ素子ごとに式 (7) で表現される屈折率分布型レンズをモデリングした。また、素子内部の応力を反映して変形を受けたレンズの表面形状を、式 (8) で表現される回転対称非球面としてモデリングした (図 7E)。

$$n(h) = n(20^\circ\text{C}) + \frac{dn}{dT} \cdot (a + bh^2 + ch^4 - T_0) \quad (7)$$

$$\text{sag}(h) = \left(\frac{(\text{curv})h^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(\text{curv})^2 h^2}} \right) + (A)h^4 + (B)h^6 + (C)h^8 + (D)h^{10} \quad (8)$$

ここで h は光軸からの面高さ、 sag は面の頂点の接平面からの面深さ、 curv は面の曲率、 k は円錐係数である。また、 a, b, c, A, B, C, D はフィッティング係数である。この

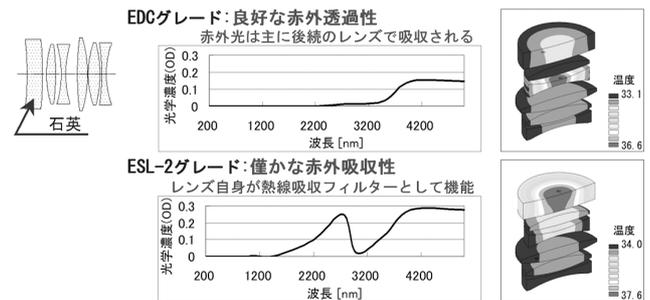


図8 CLUレンズ内の温度分布解析結果。入射側レンズの赤外吸収率がわずかに異なるだけでレンズ内部の温度分布は顕著に変化する。

ようにして得たレンズモデルに対して光線追跡を行った結果、ノミナルな像面にシミュレーション上の性能評価面を固定したままでも、 $20^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ において視野全面にわたってストレール比 0.96 以上の性能が確保できることを確認できた。一方、FEM の結果から得られた主応力と、各レンズ材料がもつ光弾性係数の実測値から CLU が発生するであろう人為偏光の程度は、レンズ表面の蒸着膜による影響を加味した場合でさえダイアテニューエーションで 3.0×10^{-4} 、リターデーションについては $2.7 \times 10^{-2} \text{ deg}$ まで抑制できることが確認できた。これは SOT に期待される水準を満たしたものであった。

一連の解析で得られた興味深い知見は、第 1 レンズの石

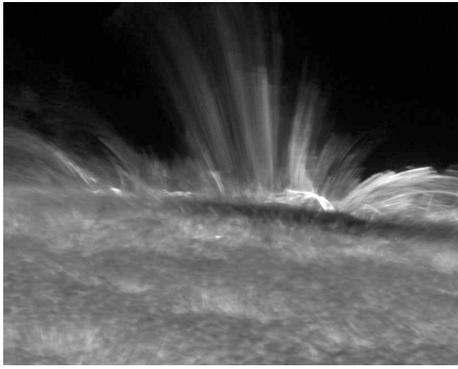


図9 波長 396.8 nm (カルシウム II 輝線) で取得した太陽表面の画像。スケールは 40000×32000 km (提供: 国立天文台/JAXA)。

英材のグレード (東ソー・クォーツ社製 ESL-2, EDC) が異なると、その赤外域の分光吸収率のわずかな差によって、CLU 内の温度分布が顕著に異なるという結果である (図 8)。この結果が熱収差量、人為偏光量に無視できない差を生じさせる。CLU の場合には、それらを勘案して ESL-2 グレードを採用した。このようにして設計された CLU は製造後に実施された MTF 試験の結果、SOT の視野直径 $\phi 400$ 秒角の全面にわたって波長 632.8 nm に対するストレール比 0.947 を達成していることが検証された。

CLU は SOT の重要なコンポーネントとして組み付けられ、打ち上げ以来現在に至るまで 5 年以上にわたって、絶えることなく科学データを地上に届けている。その成果によって、太陽上層大気が、熱源である光球よりも温度が顕

著に高くなるというコロナ加熱機構の解明の糸口が得られるなど⁵⁾、大きな成果を挙げている。図 9 には、SOT で撮像した太陽リムのフレア爆発の画像を示す。0.3 秒角 (200 km) 程度の微細な構造が見えている。SOT がもつ高い解像度によって世界で初めて得ることができた画像である。

レンズ設計は、古典に属する技術とみられがちである。しかし本稿に示したとおり、熱的性質、機械的性質と組み合わせた非線形な連成最適化問題としてとらえると、まだまだ奥深いものがある。とりわけ宇宙環境に代表される特殊な条件下において、さらなる発展が期待されている。

文 献

- 1) Y. Suematsu, S. Tsuneta, K. Ichimoto, T. Shimizu, M. Otsubo, W. Katsukawa, M. Nakagiri, M. Noguchi, T. Tamura, Y. Kato, H. Hara, M. Kubo, I. Mikami, H. Saito, T. Matsushita, N. Kawaguchi, T. Nakaoji, K. Nagae, S. Shimada, N. Takeyama and T. Yamamuro: "The solar optical telescope of Solar-B (Hinode): The optical telescope assembly," *Sol. Phys.*, **249** (2008) 197-220.
- 2) 西野洋平, 末松芳法, 常田佐久, 一本 潔, 木挽俊彦, 武山 芸英: "次期太陽観測衛星用光学ガラスの放射線耐性試験", 国立天文台報, **3** (1998) 145-150.
- 3) A. E. Conrady and R. Kingslake: *Applied Optics and Optical Design Part One* (Dover Publications, New York, 1992) pp. 142-159.
- 4) D. Malacara and Z. Malacara: *Handbook of Optical Design*, 2nd ed. (Marcel Dekker, New York, 2004) p. 159.
- 5) 「ひので」特集号, *Science*, **318** (2007).

(2011 年 4 月 12 日受理)