



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-11-004

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

真空紫外シュミットカメラ用MgF₂非球面補正板の開発

田口 真, 中村 哲也, 小野 淳也

2012年2月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

真空紫外シュミットカメラ用 MgF₂ 非球面補正板の開発*

田口 真^{*1}, 中村 哲也^{*2}, 小野 淳也^{*3}

Development of an MgF₂ aspheric corrector for a VUV Schmidt camera*

Makoto TAGUCHI^{*1}, Tetsuya NAKAMURA^{*2} and Junya ONO^{*3}

Abstract

Variations of electron density in the ionosphere accompanied by traveling ionospheric disturbances and plasma bubbles have been observed using ground-based airglow imaging and total electron content (TEC) measurements by a GPS network. However, these ground-based observations can detect only a portion of such wide-area phenomena, because the field-of-view from a ground station is limited. On the other hand, the intensity of the OI 135.6 nm night airglow emitted by radiative recombination processes is proportional to the square of the electron density in the F-region. Imaging the OI 135.6 nm emission using a geostationary satellite can reveal the entire distribution of these ionospheric phenomena. To detect variations in the weak OI 135.6 nm emission (~10 R) in middle and high latitudes with a spatial resolution of 100 km and a signal count of 1000 for an exposure time of 20 min, a sensitivity of 0.075 cts/s/R/pixel is required for a satellite-borne far ultraviolet (FUV) imager. For this reason, we adopted fast Schmidt optics for the FUV imager. The most technically challenging aspect of the design of such optics is the fabrication of an aspheric corrector using a vacuum ultraviolet transparent crystalline material such as MgF₂. In the present study, two different machining processes, magneto-rheological finishing and high-accuracy grinding, were compared for fine finishing the aspheric surfaces of the MgF₂ plates. The quality of the finished surfaces was evaluated by optical interferometry, and it was confirmed that a surface accuracy of 0.5λ PV (peak-to-valley) @ 135.6 nm was achieved with both processes. Since high-accuracy grinding was found to be more appropriate with regard to machining time, an aspheric surface with a 60% diameter (= 60 mm) and a maximum gradient and sag identical to those for the flight model corrector was manufactured using this process. The accuracy of the finished surface was evaluated to be 0.53λ PV. Simulations were then carried out to determine the overall optical performance of a corrector fabricated in this manner, and it was concluded that Schmidt optics using such a corrector can achieve the spatial resolution required for the FUV imager.

Key words: ionosphere, imaging, thermosphere

概要

これまで地上からの大気光撮像や GPS を使った全電子数観測によって電離圏におけるプラズマバブルや伝搬性電離圏擾乱といった電子密度変動が観測されてきた。しかし、地上からは観測可能な範囲が限られているため、これらの現象のほんの一部分しか捉えることができない。一方、酸素原子の放射再結合で放射される OI 135.6 nm 夜間大気光の放射強度は電離層 F 層の電子密度の二乗にほぼ比例する。したがって静止衛星を利用して OI 135.6 nm

* 平成 23 年 12 月 14 日受付 (Received 14 December 2011)

1 立教大学 理学部 (College of Science, Rikkyo University)

2 キヤノン電子株式会社 (Canon Electronics Inc.)

3 ソニー株式会社 (Sony Corporation)

大気光を撮像すれば、これらの電離圏現象の全体像を捉えることが可能である。中高緯度での OI 135.6 nm 大気光の発光強度は 10 R 程度であり、静止軌道から電離圏での水平距離 100 km の空間分解能で撮像する場合、露出時間 20 分で 1000 カウント得るためには 0.075 cts/s/R/pixel の感度が必要である。そこで真空紫外イメージャーの光学系として非常に明るいシュミット光学系を採用することとした。シュミット光学系で最も技術的に困難な要素は真空紫外光を透過する MgF₂ などの結晶材料を基板とした非球面補正板の製作である。まず、MgF₂ を補正板材料として用いたシュミット光学系を設計し、MgF₂ の精密加工技術を確立するために、磁性流体研磨と高精度ダイレクト研削の二通りの方法で球面を試作した。干渉計を用いて面精度を評価した結果、両者ともに 0.5λ PV (peak-to-valley) @ 135.6 nm 程度の面精度を達成できた。加工時間を考慮すると高精度ダイレクト研削が適することがわかった。次に、フライトモデルのシュミット補正板と同程度の最大傾斜、サグ量と 60% の直径 (= 60 mm) を有する小型 MgF₂ シュミット補正板を設計し、高精度ダイレクト研削を用いて試作した。その結果、面精度は 0.53λ PV となった。高精度ダイレクト研削を用いて補正板を製作したと仮定して、シュミット光学系全体の性能を評価したところ、要求される空間解像度を十分に満たしていることが確かめられた。

1 序論

1.1 電離圏変動現象

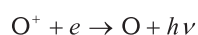
近年、光や電波を使ったリモートセンシング技術の発展に伴って、様々な電離圏擾乱の時空間発展の可視化が進んできた。1950 年代から伝播性電離圏擾乱 (Traveling Ionospheric Disturbance: TID) と呼ばれる F 層プラズマの波状摂動が知られていた。近年では CCD による OI 630 nm 大気光の撮像観測^{1,2)} や GPS 電波を使った全電子数観測³⁾ が可能となったことで、中低緯度領域において電子密度の波状構造の二次元分布が明らかとなってきた。久保田らは OI 630 nm 大気光地上全天イメージャーネットワークを使って、TID が日本列島上空を北東から南西へ伝播していく様子を捉えた⁴⁾。しかし、その起源や空間的広がり、そして末路は視野の外となり、解明されていない。一方、大塚らは磁力線でつながれた日本の佐多とオーストラリアのダーウィンの二地点で OI 630 nm 大気光同時観測を行い、TID の南北対称性を発見した⁵⁾。

低緯度電離圏で、レーリー・テイラー不安定によって生じた東向きの電場により、F 層の低密度のプラズマが垂直に上昇する現象をプラズマバブルという⁶⁾。アルベリコ、プエルトリコなど中緯度において磁気赤道上で高度 1500 km 以上まで上昇するプラズマバブルによる夜間大気光の減光が観測された¹⁾。また、低緯度域でのプラズマバブルによる夜間大気光の減光が全天イメージャーによって撮像された^{7,8)}。大塚らは佐多とダーウィンの地磁気共役点で同時観測された 630 nm 大気光画像に対称な構造が見られたことから、プラズマバブルは磁力線に沿って分かれて伸びて、南北半球に対称な電子密度減少領域を形成することを発見した⁹⁾。

TID やプラズマバブルがもたらす電子密度変動は測位衛星による位置測定に大きな誤差を生じさせる。衛星航法の安全性を高めるために、それらの現象の現況観測と発生予想は重要である。しかし、これまでの研究手法のように地上観測に頼っているのは、広域で安定した情報の供給は不可能である。これらの電離圏擾乱をグローバルに時間的に連続して観測するためには、高高度の人工衛星からの撮像観測が適している。

1.2 人工衛星による電離圏撮像観測

地球大気組成は、高度 100 km より上では太陽紫外線によって酸素分子が解離し酸素原子が主成分となる。酸素原子は太陽紫外線によって電離して酸素原子イオンとなる。OI 135.6 nm 大気光はこの酸素原子イオンの放射再結合過程



で放射される。放射強度は次式で見積もられる。

$$I = \int \alpha_{135.6} n(\text{O}^+) n(e) dz$$

ここで、 $\alpha_{135.6}$ は放射反応係数である。OI 135.6 nm はイオン-イオン再結合によっても放射されるが、放射再結合に比べて非常に少ないため無視できる。

F 層のイオンの大半は酸素原子イオンが占めるため、上式において $n(O^+) \approx n(e)$ と置くことができ、放射強度は電子密度のほぼ二乗に比例する。したがって、この大気光の強度を測れば F 層電子密度がわかる。波長 135.6 nm はいわゆる真空紫外領域にあり、酸素分子による吸収のため電離層での発光は地上に到達しない。しかし、その外側の宇宙空間から見れば、大気吸収はほとんどないため観測することができる。しかも、太陽紫外光は下層の大気で吸収されるため、昼面からの散乱太陽光は非常に弱い。

夜間では OI 130.4 nm の共鳴線も同程度の強度で発光するが、許容線であるため酸素原子密度が高い高度領域では多重散乱する。散乱された太陽光が夜側にまで回り込み、地球コロナを形成する。OI 130.4 nm 輝線は電子密度の局所的な濃淡をあまり反映しない。したがって、電離圏電子密度のリモートセンシングでは光学的に薄い OI 135.6 nm を利用の方が細かい構造が見える。

このような理由から、OI 135.6 nm はこれまで衛星からの大気光観測並びにオーロラ観測に使われてきた。TIMED 衛星は低高度で軌道傾斜角 74° の円軌道から中間圏、熱圏、電離圏領域におけるエネルギーの流出入による圧力、温度、風構造の理解を目的として打ち上げられた衛星である。TIMED 衛星に搭載された GUVI はスキャンミラーを動かして地球のリムとディスクを観測し、上層大気の H、O、N₂ の輝線と O₂ の吸収線が主要となる 120~180 nm の大気光のスペクトルを測定する。波長分解能が高い反面、感度は高くない。そのため中緯度の暗い夜間大気光を捉える事はできない。GUVI が一日かけて撮像した OI 135.6 nm 画像を合成して作成されたグローバルイメージには、OI 135.6 nm 亜熱帯大気光の中にプラズマバブルに対応すると思われる減光領域が見られる。しかし、衛星高度が低いいため、グローバルイメージのスナップショットはできない¹⁰⁾。

IMAGE 衛星にはオーロラの同時観測をするための複数の FUVI が搭載されている。FUVI は二つの光学センサーから構成されていて、そのうちのひとつ WIC は 140-190 nm に感度を持ち、オーロラの強度を広範囲に観測する。F 値 1 の明るい逆カセグレン式光学系を採用している¹¹⁾。逆カセグレン式は、凸双曲面の主鏡と凹放物面の副鏡の反射 2 面だけで構成される光学系で、明るく視野が広いという特徴をもち、広い波長領域に対応できるので、多くの衛星搭載オーロライメージャーに採用されている。もう一つのセンサー SI はオーロラのドップラーシフトした水素ライマン α 121.8 nm と OI 135.6 nm を中心とした 8 nm のバンド幅を持つ観測器である¹²⁾。SI は亜熱帯域の経度方向に広がる OI 135.6 nm の明るいバンド構造を捉えたが、100 km 未満となることもある単体のプラズマバブルを分解するには至っていない¹³⁾。

同様に低高度極軌道衛星である ARGOS 衛星に搭載された GIMI は紫外撮像によって電離圏 F 層のイオン、電子、中性原子の密度分布を広域観測することを目的としている¹⁴⁾。GIMI は FUV(131-160 nm, 131-200 nm) と EUV (75-110 nm) を観測する二つのカメラから構成される。GIMI は少ない光学素子で明るい光学系を実現するために、シュミットカメラを基本とする光学系を採用している。GIMI による観測データは公表されていないが、やはり低軌道であるためにグローバルなスナップショット撮影は行うことができない。

1.3 本研究の開発目的

既存の衛星搭載真空紫外イメージャーは感度不足のため OI 135.6 nm の最も暗い中緯度領域を捉えることができないこと、そして多くは低高度軌道にあることから、先にあげた電離圏変動現象の全体像を捉えることはできない。そこで、地球全体を見渡せる静止軌道から中緯度の最も暗い領域も変動現象の時間スケール以下の露出時間で撮像可能な、高感度の衛星搭載真空紫外イメージャー (FUVI) を開発する必要がある。

これまで国外の衛星に搭載された FUVI はほとんどが IMAGE 衛星 WIC のような逆カセグレン式の光学系を採用していた。一方、可視域で一般的に用いられる明るい光学系で GIMI に採用されたシュミットカメラも同等の明るさを実現できる。シュミットカメラは主鏡を球面鏡とし、高次非球面の補正レンズを用いることで球面収差やコマ収差を除去できる非常に明るい光学系である。逆カセグレン式と比較して反射面が 1 枚で済むという利点がある。主鏡が球面鏡であるので、真空紫外領域で要求される高い面精度の鏡面も比較的製作が容易である。また、シュミットカメラは補正板によって鏡筒内を密閉できるので、地上試験中に鏡筒内を窒素パージすることによって検出器の光電面の劣化を防ぐことができる。しかし、真空紫外領域は可視光領域と比較して波長が約 1/4 であるので高精度の光学面製作技術

が必要である。特に高次非球面のシュミット補正板の製作には、高度の研磨及び検査技術が必要である。また、透過光学材料として使用できるのは MgF₂ など一部の結晶材料のみである。

静止衛星搭載 FUVI 光学系として逆カセグレン式光学系とシュミット光学系を比較検討した結果、開発要素はあるものの、光学性能の優位性から、シュミット光学系を採用することとした。本研究では MgF₂ を非球面補正板の材料として用いたシュミット光学系の設計と、その実現のために必須な技術的課題である MgF₂ の精密光学面加工技術開発について報告する。

表1 真空紫外シュミットカメラの主要パラメータ

パラメータ	値
大気光の明るさ I	10 [R]
開口面積 A	25 π [cm ²]
視野 FOV	16°
画素数	128 × 128 [pixels]
1 画素の張る立体角 Ω	4.8 × 10 ⁻⁶ [sr]
主鏡反射率 R	0.5
補正板透過率 T_L (5 mm 厚 MgF ₂)	0.76
検出器量子効率 η	0.18
バンドパスフィルター透過率 T_F	0.05
中心遮蔽率 C	0.75
露光時間 τ	1200 [s]
感度	0.075 [cts/s/R/pixel]

2. 真空紫外シュミットカメラ

2.1 要求仕様

まず、真空紫外シュミットカメラに要求される性能をその根拠と共に明らかにする。静止軌道の高度 36000 km から地球全体を視野に収めるという要求から、視野角 16° が決定される。捉えたい現象 (TID, プラズマバブル等) の最小空間スケールを 150 km と設定した。静止軌道から電離圏での水平距離 150 km の構造を見分けるために、その半分の長さ 75 km が 1 画素に投影されるとすると、1 画素が張る角度は 0.13° となる。これは地球直径を覆う角度すなわち視野角をおよそ 128 分割する角度である。

典型的な中緯度の OI 135.6 nm 大気光の明るさは、10 R (R: レーリー, 1 R = 10⁶ photons/cm²/s) 程度であるため、できるだけ明るく効率の高い光学系にする必要がある。TID の波長が 100 km スケールで、約 100 m/s で移動することから、露出時間は 20 分程度よりも短くしなければならない。20 分で約 900 カウント (S/N=30) を得るために、感度は 0.075 cts/s/R/pixel が必要である。鏡の反射率、レンズ透過率、フィルター透過率、検出器量子効率を使って必要な F 値を計算すると、F は 1.0 となる。検出器には直径 27 mm のマイクロチャンネルプレート (MCP) とそれを 128 分割する位置分解能のレジスティヴアノードエンコーダー (RAE) を用いる。これを 128 個の仮想的な画素があると見なす。高度 36000 km から 1 画素あたり 75 km を検出する要請から、焦点距離は 100 mm となる。これらの条件から決められた光学系の主要なパラメータを表 1 にまとめた。

表 1 に示される真空紫外シュミットカメラによって OI 135.6 nm 大気光を観測した場合に予想されるシグナルカウン트는次の式で与えられる。

$$N = \frac{10^6}{4\pi} I A \Omega T_F T_L R \eta C \tau \text{ [cts]}$$

I は放射強度 [R], A は開口面積 [cm²], Ω は 1 画素の張る立体角 [sr], T_F はフィルター透過率, T_L は MgF₂ 補正板透過率, R は主鏡反射率, η は検出器の量子効率, C は中心遮蔽率, τ は露出時間 [s] を表す。これらの設計値を表 1 に示す。上式に表 1 で与えられる各値を代入すると、感度は目標値 0.075 cts/s/R/pixel となり、カウント数はおよそ 900 となる。

OI 135.6 nm の付近には非常に明るい H Lyman α 121.6 nm と OI 135.6 nm と同程度の明るさの OI 130.4 nm の地球コロナ成分が存在する。そこで、バンドパスフィルターなどを通してこれらの光の低減を図らなければならない。Meier によるこれらの輝線の標準的な強度とフィルター、検出器の波長特性を考慮すると、OI 135.6 nm のカウント数と同程度の HI 121.6 nm 及び OI 130.4 nm によるカウントを検出すると見積もられた¹⁵⁾。これらのコロナ成分は多重散乱により

微細な構造をもたないため、モデル大気を使った解析によって HI 121.6 nm 及び OI 130.4 nm によるカウントを取り除くことで OI 135.6 nm に含まれる変動成分を検出することができる。

2.2 光学設計

図1は設計されたシュミット光学系の光路図である。図中の数字はエレメント番号を表している。1はMgF₂補正板、2は主鏡、3はMgF₂レンズ、4が焦点面となっている。シュミットカメラの主鏡は球面鏡であり、高精度面の製作が容易である一方、補正板は非球面であり、高精度の加工が困難である。図1には補正板の非球面形状がわかりやすいように光軸方向のスケールを10倍に引き延ばしたものを同時に示してある。中央が凸レンズ、周辺が凹レンズになっていることがわかる。

図1に示した光学系の補正板形状を表す非球面は次の式で与えられる。

$$z = \frac{c}{1 + \sqrt{1 - c^2 y^2}} y^2 + Ay^4 + By^6 + Cy^8$$

$$c = -4.32339 \times 10^{-4}$$

$$A = 4.35615328335 \times 10^8$$

$$B = 1.36401615801 \times 10^{-12}$$

$$C = 4.46844603489 \times 10^{-17}$$

ここで、 z は光軸方向、 y は光軸に垂直な方向を表す。

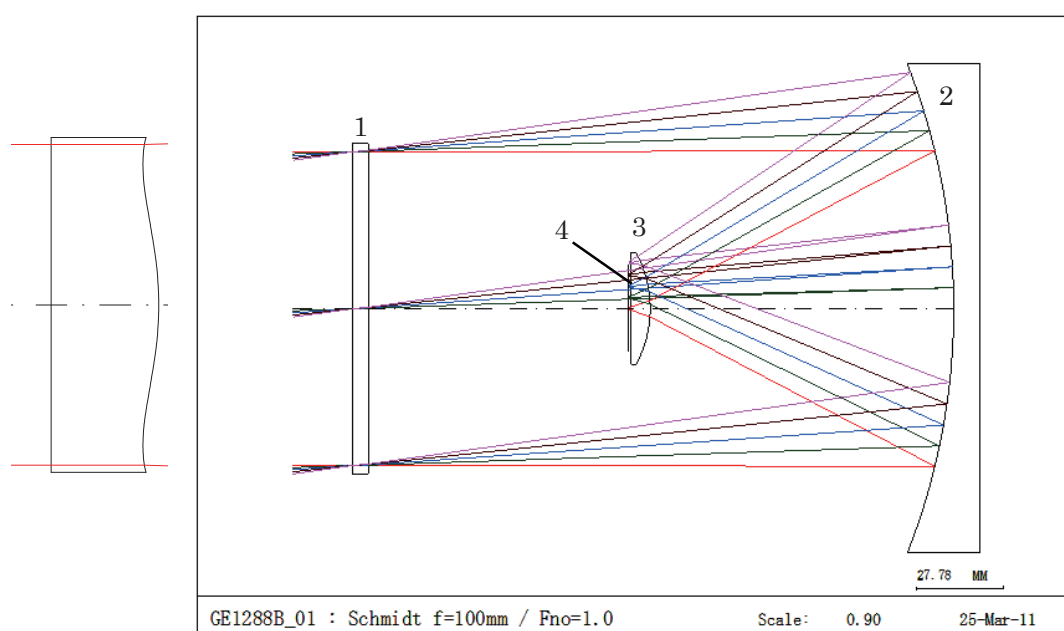


図1 設計した真空紫外シュミットカメラの光路図。左に示したのは非球面形状がわかりやすいように光軸方向に10倍に拡大した補正板。

補正板は前面を平面、後面を非球面とし、後面の頂点を球面鏡の曲率中心と一致させる。補正板の平面にフィルターのコーティングを施すことでフィルター基板を省略し効率を高める。エレメント番号3のMgF₂レンズはシュミットカメラの強い像面湾曲を補正するためのものである。表2にこれらの光学系のレンズデータを示す。焦点距離は100 mm、F値は1.0で、要求仕様を満たしている。

設計された光学系の結像性能はスポットダイアグラムとMTF (Modulation Transfer Function)で確認する。検出器の1画素あたりの大きさは約200 μmであるので、結像面でのスポット径を200 μmより小さくすれば、空間波長400 μm (=2画素: ナイキストサンプリング)の明暗を見わけることができる。一方、結像面での空間波長400 μmを空間周波

表2 真空紫外シュミットカメラのレンズデータ

エレメント番号	面番号	面形状	曲率半径 [mm]	次の面との面間隔 [mm]	材質	エレメント半径 [mm]
1	1	平面	無限	5.26	MgF ₂	50.0
	2	非球面	-2313	188		50.5
2	3	球面	-210.8	-97.6	MgF ₂	75.3
	4	球面	-37.1	-6.32		16.7
3	5	平面	無限	-0.695		15.3

数に変換すると 2.5 cycle/mm である。この空間モジュレーションをはっきりと捉えるという要請から、MTF > 0.8 @ 2.5 cycle/mm を達成目標とする。

真空紫外シュミット望遠鏡を実用化する上での問題点として、レンズには真空紫外線を透過する光学材料を使用する必要があり、光学試験は全て真空中で行わなければならないということがあげられる。透過光学材料として使用できるのは MgF₂ など一部の結晶材料のみである。MgF₂ は正方晶系の結晶で、複屈折を起こす。MgF₂ の屈折率は Williams らによる MgF₂ 屈折率のデータと Chandrasekharan らの複屈折率測定データを参考にした^{16, 17)}。波長 135.6 nm における常光線及び異常光線に対する屈折率はそれぞれ $n(O)=1.531$, $n(E)=1.545$ となった。これらの値を採用して複屈折の効果を考慮して光学性能を計算した結果、この光学設計はスポットサイズ < 200 μm , MTF > 0.8 @ 2.5 cycle/mm を満たしていることが確認された。

光学系以外の要素については、過去の地球・惑星観測衛星搭載機器の技術を利用することで実現可能である。検出器には Extreme ultraviolet spectroscope for Exospheric Dynamics (EXEED) に搭載される MCP とレジスティブアノードの組み合わせを使用する¹⁸⁾。熱、構造、電子回路、放射線耐性、内部構造と表面処理に関しては「のぞみ」XUV¹⁹⁾、UVS²⁰⁾ や「かぐや」の TEX²¹⁾ 及び TVIS²²⁾ で培われた技術が基本となる。

3. 非球面補正板製作技術開発

3.1 磁性流体研磨と高精度ダイレクト研削の比較

FUVI では可視光と比較して観測波長が短いので、その分、面精度を高くしなければならない。波長 135.6 nm は通常の可視光の波長の約 1/4 であるため、面精度は可視光用レンズの 4 倍必要である。したがって高度な研磨技術が必要になる。MgF₂ 基板を非球面形状に加工する工程として、研削と磁性流体研磨の組み合わせ、専用研削砥石による高精度ダイレクト研削のどちらが適するか判断するため、この 2 通りの方法で球面を試作して、面精度、面粗度、加工コストの比較を行った。面形状評価には波長 632.8 nm の He-Ne レーザー光を用いたフィゾー型干渉計を使用した。

まず、高精度 NC 研削機を用いて直径 30 mm の円形 MgF₂ 基板に曲率半径 200 mm の凹面を形成し、その後、磁性流体研磨により局部的に凸形状となっている部位のみを選択的に修正研磨した。その際に、干渉計で計測された球面からの誤差量の 30% または 50% を次回の目標研磨量として設定した。研磨と干渉計による検査を繰り返し、面精度の向上を図った。形状測定は基板の中心部の直径 25 mm の円内に限った。その結果、図 2 に示すように研磨 7 回目で波長 135.6 nm で測った面精度が 0.051 λ rms (root mean square), 0.50 λ PV (peak-to-valley) という値を達成した。

フライトモデル光学系の F 値が 1.0 であることから光学系のレイリー限界は像高に換算して $1.22\lambda F = 0.165 \mu\text{m}$ である。一方、この像面に置かれる検出器の画素寸法は 200 μm であるため、もし仮に回折限界像ができたとしても、画像解像度はレイリー限界よりもはるかに大きい検出器画素サイズによって決定されていることがわかる。したがって、今回試作した MgF₂ 補正板の面精度と同等か多少劣るという程度の面精度を有する補正板を用いて真空紫外シュミットカメラを構成すれば、要求される空間分解能を十分に満たすことができると判断できる。

表 3 に示すように、研磨回数を重ねていくと、あるときから面精度の向上が見られなくなるという特性が現れた。この原因は研磨の進行とともに被加工面の面粗度が向上すると機械が研磨制御性を失ってしまうためであると考えら

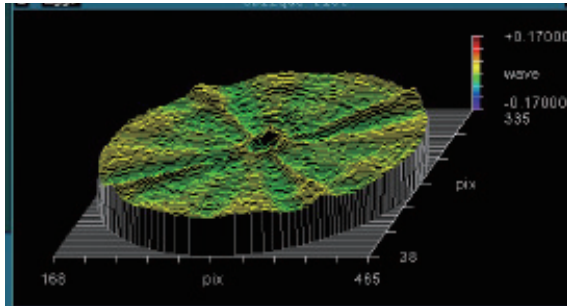


図2 7回目の磁性流体研磨後に測定された面形状残差.

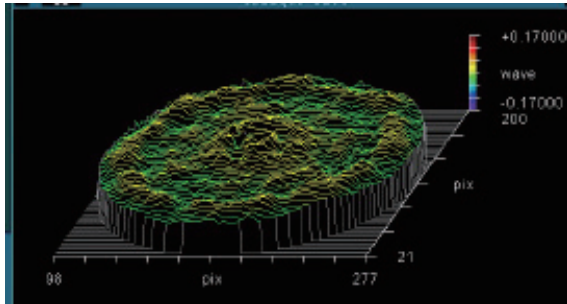


図3 高精度ダイレクト研削による球面の面形状残差.

表3 磁性流体研磨回数と面精度

研磨回数	面精度 λ @ 135.6 nm	
	rms	PV
0	0.117	0.75
1	0.145	0.92
2	0.103	0.68
3	0.084	0.52
4	0.065	0.43
5	0.051	0.54
6	0.056	0.51
7	0.051	0.50

れる。面形状残差に表れる放射状の模様は MgF₂ の結晶構造を反映している。一方、面粗度は最終的に 0.0082 λ rms という値が得られた。この値は一般のレンズで採用される面粗度目標値である $\lambda/100$ をクリアしている。

磁性流体研磨では直径 25 mm の基板全面を加工するとき、加工深さ 1 μm あたり、約 1 時間の加工時間を要した。面積比から考えると直径 100 mm の加工には約 16 倍の時間が必要になると思われる。しかし、磁性流体研磨は長時間の連続稼働が困難であり、1 回あたりの加工時間は 8 時間程度が限界である。このため、実際の非球面加工では加工全体完了まで総計数百時間におよぶ可能性がある。これは技術的に不可能ではないが、製造コストの点で好ましくない。

次に、別の直径 30 mm の MgF₂ 基板に、曲率半径 200 mm の凹面を最新型の専用研削砥石を用いた高精度ダイレクト研削装置によって加工を試みた。砥石のメッシュは #2000 で、研削後には軽いハンドポリッシュを行った。結果は表 4 に示すように、面精度及び面粗度ともに磁性流体研磨よりはやや劣るが、目標とする品位にほぼ到達できた。図 3 に示すように、磁性流体研磨品と比較して、残差に明確な周期的構造が現れている。磁性流体研磨による残差は十文字状であったのに対し、高精度ダイレクト研削による残差は同心円状である。つまり両者は直交している。磁性流体研磨は面粗度が大きい状態ほど制御性が高いという経験則から、ダイレクト研削の後、磁性流体研磨を施すことで、加工時間数を抑えながら面精度を向上させられると予想される。

表4 磁性流体研磨と高精度ダイレクト研削加工の比較

面形状	加工法	面精度 λ @ 135.6 nm		面粗度 λ @ 135.6 nm	
		rms	PV	rms	PV
球面	磁性流体研磨	0.051	0.50	0.0082	0.040
	高精度ダイレクト研削	0.079	0.53	0.015	0.090

3.2 高精度ダイレクト研削による MgF₂ 非球面の製作

非球面補正板の製作可能性を評価するにあたり、フライトモデルと同サイズの補正板の製作はコストがかかるため、有効口径 60 mm の評価用小型補正板を設計した。補正板の研磨は非球面の傾斜、サグ量が最大になる領域が特に困難となる。そこで、フライトモデルのシュミット補正板と同程度の傾斜、サグ量を有する設計とした。評価用補正板の製作方法には高精度ダイレクト研削を用いた。干渉計によって非球面形状を評価するとき、そのままでは補正板を透過した光束は発散してしまい測定できない。そこで、補正板の透過光を平行光に変換する 2 枚組レンズ（ヌルレンズ）

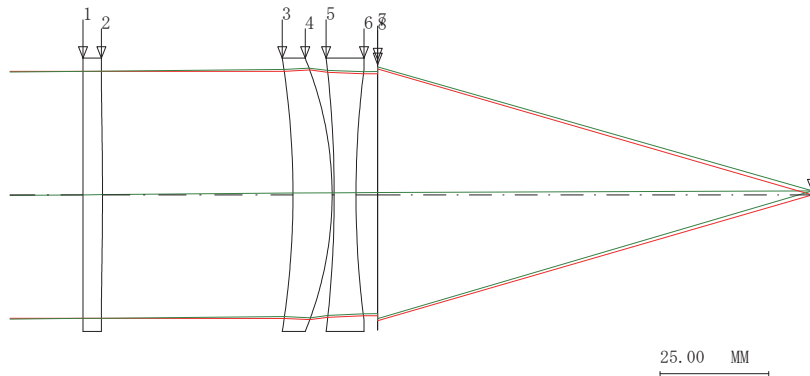


図4 評価用補正板とマルチレンズ光学系の光路図。

を設計・製作した。評価用補正板とマルチレンズのレンズデータを表5に、光路図を図4に示す。マルチレンズは全ての面が球面であり、非球面補正板に比べて高い面精度で製造可能である。よって、マルチレンズと補正板を組み合わせた光学系の性能を干渉計で測定することにより、非球面の補正板の面精度を評価することができる。

実際のフライトモデルでは光軸中心に検出器が置かれるため、入射光束の中心部分は遮蔽される。フライトモデルの中心遮蔽を直径50 mmとすると、評価用光学系では直径30 mmとなる。その部分を遮蔽し、透過波面を評価した。面形状残差を図5に示す。面精度は 0.10λ rms, 0.53λ PVとなった。回折限界の性能を発揮する面精度には達していないが、検出器画素サイズがレイリー限界よりも遙かに大きいことを考えると、この面精度で補正板を製作できれば、要求される解像度は達成されると予想される。

今回の試作によって達成された面精度で補正板を製作したときに、できあがった光学系の性能をシミュレーションした。補正板の屈折率を n 、補正板の厚さの誤差を δ とすると、厚みの差による光路差は $(n-1)\delta$ となる。 MgF_2 は $n \approx 1.5$ であるため、光路差は $\delta/2$ になる。今回の試作で波面収差のPVが 0.53λ であったので、透過板の厚み誤差 δ の最大値は143 nmとなる。

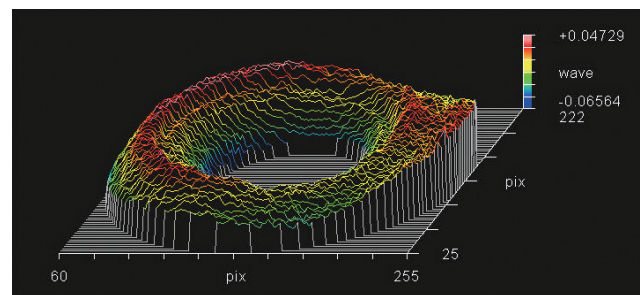


図5 高精度ダイレクト研削による評価用補正板の面形状残差。

表5 評価用補正板とマルチレンズのレンズデータ

エレメント番号	面番号	面形状	曲率半径 [mm]	次の面との面間隔 [mm]	材質	エレメント半径 [mm]
1	1	平面	無限	4.50	MgF_2	28.0
	2	非球面	-754	43.8		28.0
2	3	球面	-196	9.00	SBSL7	28.4
	4	球面	-80.5	0.50		28.7
3	5	球面	-258	5.0	SBSL7	28.2
	6	球面	220	5.0		27.9

そこで、FUVIの補正板に ± 143 nmの面形状誤差を与えたときにFUVIの要求であるスポットダイアグラムの直径が $200 \mu\text{m}$ 以下、MTFが $0.8 @ 2.5 \text{ cycle/mm}$ 以上を満たすかどうかを確認した。補正板非球面上でサグ量が最大となる凹面において厚み誤差を $+143$ nmとしたときのスポットダイアグラムを図6に、MTFを図7に示す。どの入射角でもスポットサイズは $100 \mu\text{m}$ 以下に収まっており、MTFも $0.95 @ 2.5 \text{ cycle/mm}$ 以上であり、どちらも余裕をもって要求

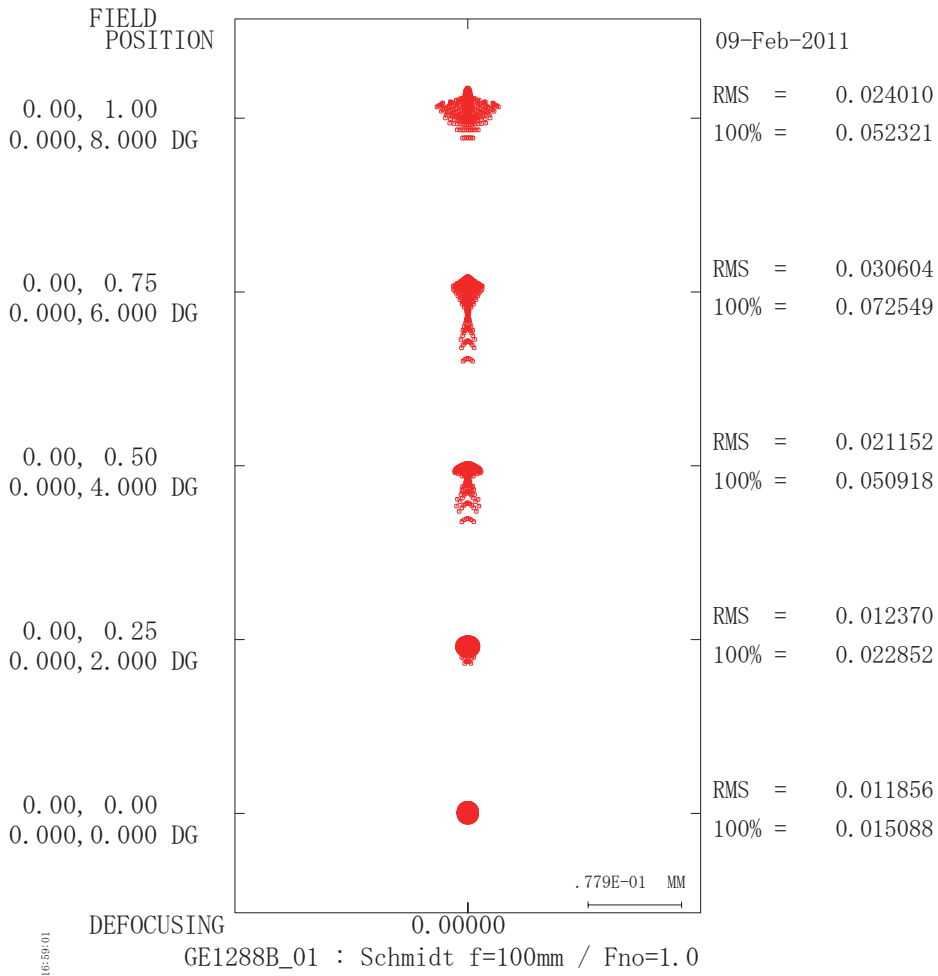


図6 面形状誤差 +143nm を与えた光学系のスポットダイアグラム。

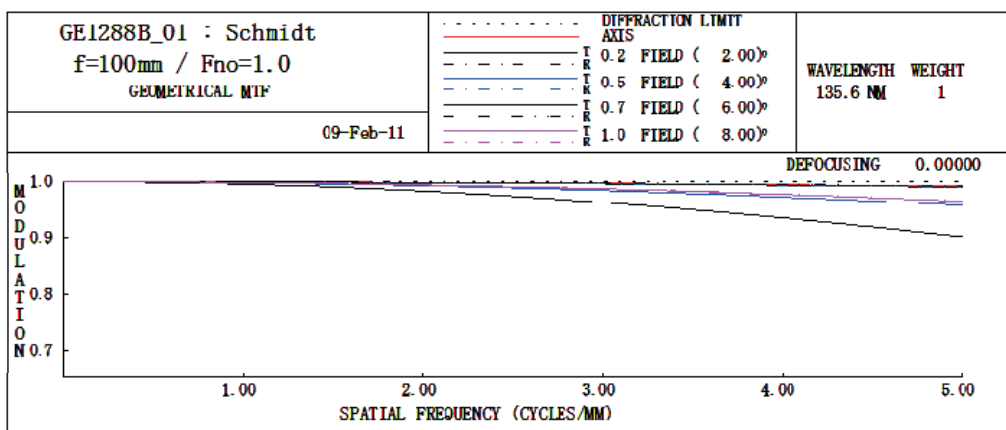


図7 面形状誤差 +143nm を与えた光学系の MTF.

仕様を満たすことが確認できる。

以上の結果から、今回製作した小型補正板と同程度の精度で FUVI の補正板を製作すれば FUVI の要求仕様を満たすことがわかった。

4. 結論

本研究では MgF_2 シュミット補正板の製造可能性を検証するため、 MgF_2 非球面の加工試験を行った。まず MgF_2 基板の球面加工について磁性流体研磨と高精度ダイレクト研削を比較したところ、両者とも要求される面精度を実現できた。高精度ダイレクト研削の後に磁性流体研磨で微修正する工程が仕上がり加工効率の点で最適である。次に MgF_2 基板に非球面を高精度ダイレクト研削を用いて加工したところ、球面と同等の面精度を実現できた。試作した非球面と同等の面精度を有するシュミット補正板を FUVI に用いた場合に、回折限界の性能には達していないものの、空間解像度に関するミッション要求を十分に満たしていることがわかった。本研究で開発されたシュミット補正板加工技術を「のぞみ」、「かぐや」など他の地球・惑星観測衛星の搭載機器で開発された技術と組み合わせることで、静止衛星から電離圏全体像を撮像できる FUVI を実現できる見込みが得られた。

謝 辞

株式会社ジェネシアの武山氏、江野口氏の光学性能評価における協力に対して心から感謝する。本研究は科学研究費補助金 (21540462)、JAXA 搭載機器基礎開発実験経費の助成を受けた。

参考文献

- 1) Mendillo, M., J. Baumgardner, D. Nottingham, J. Aarons, B. Reinisch, J. Scali, and M. Kelley, Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300-Å images from the Arecibo Observatory, *J. Geophys. Res.*, Vol.102 (1997), pp.7331-7343.
- 2) Taylor, M. J., J. -M. Jahn, S. Fukao, and A. Saito, Possible evidence of gravity wave coupling into the mid-latitude F region ionosphere during the SEEK campaign, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25 (1998), pp.1801-1804.
- 3) Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki, High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25 (1998), pp.3079-3082.
- 4) Kubota, M., K. Shiokawa, M. K. Ejiri, Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Sakanoi, H. Fukunishi, M. Yamamoto, S. Fukao, and A. Saito, Traveling ionospheric disturbances observed in the OI 630-nm nightglow images over Japan by using a multipoint imager network during the FRONT campaign, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.27 (2000), pp.4037-4040.
- 5) Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson, Geomagnetic conjugate observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude using all-sky airglow imagers, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.31 (2004), L15803, doi:10.1029/2004GL020262.
- 6) Farley, D. T., E. Bonelli, B. G. Fejer, and M. F. Larsen, The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol.91 (1986), pp.13723-13728.
- 7) Sahai, Y., P. R. Fagundes, and J. A. Bittencourt, Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: Solar cycle effects, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.62 (2000), pp.1377-1383.
- 8) Abalde, J. R., P. R. Fagundes, J. A. Bittencourt, and Y. Sahai, Observations of equatorial F region plasma bubbles using simultaneous OI 777.4 nm and OI 630.0 nm imaging: New results, *J. Geophys. Res.*, Vol.106 (2001), pp.30331-30336.
- 9) Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson, Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.29 (2002), 1753, 10.1029/2002GL015347.
- 10) Christensen, A. B., L. J. Paxton, S. Avery, J. Craven, G. Crowley, D. C. Humm, H. Kill, R. R. Meier, C. I. Meng, D. Morrison, B. S. Ogorzalek, P. Straus, D. J. Strickland, R. M. Swenson, R. L. Walterscheid, B. Wolven, and Y. Zhang, Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) in the NASA TIMED satellite mission, *J. Geophys. Res.*, Vol.108 (2003), 1451, doi:10.1029/2003JA009918.
- 11) Mende, S. B., H. Heeterds, H. U. Frey, M. Lampton, S. P. Geller, R. Abiad, O. H. W. Siegmund, A. S. Tremsin, J. Spann, H.

- Dougani, S. A. Fuselier, A. L. Magoncelli, M. B. Bumala, S. Murphree, and T. Trondsen, Far Ultraviolet Imaging from the IMAGE Spacecraft. 2. Wideband FUV Imaging, *Space Sci. Rev.*, Vol.91 (2000), pp.271-285.
- 12) Mende, S. B., H. Heetderks, H. U. Frey, J. M. Stock, M. Lampton, S. P. Geller, R. Abiad, O. H. W. Siegmund, S. Habraken, E. Renotte, C. Jamar, P. Rochus, J.-C. Gerard, R. Sigler and H. Lauche, Far Ultraviolet Imaging from the IMAGE Spacecraft. 3. Spectral Imaging of Lyman- α and OI 135.6 nm, *Space Sci. Rev.*, Vol.91 (2000), 287-318.
 - 13) Sagawa, E., T. Maruyama, T. J. Immel, H. U. Frey, and S. B. Mende, Global view of the nighttime low-latitude ionosphere by the IMAGE/FUV 135.6nm observations, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.30 (2003), 1534, doi:10.1029/2003GL017140.
 - 14) Carruthers, G. R., and T. D. Seeley, Global Imaging Monitor of the Ionosphere (GIMI): a Far-Ultraviolet Imaging Experiment on ARGOS, *SPIE*, Vol.2831 (1996), pp.65-93.
 - 15) Meier, R. R., Ultraviolet Spectroscopy and Remote Sensing of the Upper Atmosphere, *Space Sci. Rev.*, Vol.58 (1991), pp.1-185.
 - 16) Williams, M. W., and E. T. Arakawa, Optical properties of crystalline MgF₂ from 115 nm to 400 nm, *Appl. Opt.*, Vol.18 (1979), pp.1477-1478.
 - 17) Chandrasekharan, V. and H. Damany, Anomalous Dispersion of Birefringence of Sapphire and Magnesium Fluoride in the Vacuum Ultraviolet, *Appl. Opt.*, Vol.8 (1969), pp.671-675.
 - 18) Yoshioka, K. G. Murakami, I. Yoshikawa, M. Ueno, K. Uemizu, A. Yamazaki: EUV observation from the Earth-orbiting satellite, EXCEED, *Adv. Space Res.*, Vol.45 (2010), pp.314-321.
 - 19) Nakamura, M., K. Yamashita, I. Yoshikawa, K. Shiomi, A. Yamazaki, S. Sasaki, Y. Takizawa, M. Hirahara, W. Miyake, Y. Saito, and S. Chakrabarti, Helium observation in the Martian ionosphere by an X-ray ultraviolet scanner on Mars orbiter NOZOMI, *Earth Planets Space*, Vol.51 (1999), pp.61-70.
 - 20) Taguchi, M., H. Fukunishi, S. Watanabe, S. Okano, Y. Takahashi, and T. D. Kawahara, Ultraviolet imaging spectrometer (UVS) experiment on board the NOZOMI spacecraft: Instrumentation and initial results, *Earth Planets Space*, Vol.52 (2000), pp.49-60.
 - 21) Yoshikawa, I., A. Yamazaki, G. Murakami, K. Yoshioka, S. Kameda, F. Ezawa, T. Toyota, W. Miyake, M. Taguchi, M. Kikuchi, and M. Nakamura: Telescope of extreme ultraviolet (TEX) onboard SELENE, *Earth Planets Space*, Vol.60 (2008), pp.407-416.
 - 22) Taguchi, M., T. Sakanoi, S. Okano, M. Kagitani, M. Kikuchi, M. Ejiri, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, G. Murakami, K. Yoshioka, S. Kameda, W. Miyake, M. Nakamura, and K. Shiokawa, The Upper Atmosphere and Plasma Imager/the Telescope of Visible Light (UPI/TVIS) onboard the Kaguya spacecraft, *Earth Planets Space*, Vol.61 (2009), pp.i-vii.