

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 11 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540462

研究課題名（和文） 電離圏電子密度モニターを目指した衛星搭載真空紫外シュミットカメラの開発

研究課題名（英文） Development of a satellite-borne vacuum ultraviolet Schmidt camera for monitoring ionospheric electron density

研究代表者

田口 真 (TAGUCHI MAKOTO)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：70236404

研究成果の概要（和文）：

真空紫外シュミットカメラの要となる非球面 MgF_2 補正板を高精度ダイレクト研削により試作し、干渉計を用いて製作精度を検証した。試作した非球面補正板の面精度は観測波長 135.6 nm に対し、約 $\lambda/3$ (PV) という値を達成できた。この面にさらに磁性流体研磨による仕上げ加工を加えれば、 $\lambda/4$ 以下の高い面精度の達成が期待できる。また、面粗度はおよそ $\lambda/100$ が達成されており、こちらは十分に実用レベルであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

An MgF_2 aspheric corrector for a VUV Schmidt camera was manufactured using high-accuracy grinding. The quality of the finished surfaces was evaluated by optical interferometry, and it was confirmed that a surface accuracy of $\lambda/3$ PV (peak-to-valley) @ 135.6 nm was achieved. A surface accuracy of $\lambda/4$ can be expected by combination of the high-accuracy grinding and magneto-rheological finishing. The surface roughness of $\lambda/100$ obtained for this test piece is good enough for practical application.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星電離圏

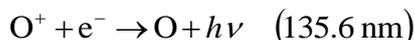
1. 研究開始当初の背景

中間圏・熱圏・電離圏(MTI)領域のグローバルなダイナミクス、例えば伝播性電離層擾乱やプラズマバブルの消長などの全体像を捉えるためには、静止衛星からの撮像が最も有効である。本研究代表者を含む MTI 領域の観測的研究者のグループは、MTI 領域を観測する気象衛星とも言うべき、小型衛星をベ

ースとした MTI 観測衛星(IMAP)を提案している。現在、実用に供されている気象衛星は対流圏の雲や地表からの放射を観測するために可視から赤外の波長領域を使っている。一方、MTI 領域を撮像するためには、その領域から発する可視から真空紫外(FUV)領域の大気光を利用する。可視域の大気光は明るく空間解像度が高いという利点があるが、昼間

側の非常に明るいレーラー散乱光が撮像の妨げになる。一方、FUV 領域（波長 100-200 nm）は下層大気中の酸素分子によって太陽光が吸収されるため、昼間側の散乱光による妨害が少ないという観測上のメリットがある。

FUV 領域には何種類かの原子・分子輝線スペクトルが存在する。その中で酸素原子 135.6 nm 輝線は



という放射再結合過程で発光する。この輝線は明るさが F 層電子密度の自乗に比例し、コロナ（共鳴散乱）成分がないため比較的高い空間解像度で発光分布を観測できる。しかし中緯度での OI 135.6 nm 大気光の明るさは 10 R 程度しかなく、積分時間 20 分で撮像しようと思うと光学系には F1.0 という光学系の明るさが必要になる。

我が国では、これまでに FUV 領域のフォトメータやイメージャーを「きよっこう」、「あけぼの」衛星に搭載したが、その技術は断絶している。その後、火星探査機「のぞみ」に極端紫外イメージャー及び真空紫外分光計、「れいめい」に可視イメージャー、「かぐや」に極端紫外イメージャー及び可視イメージャー、PLANET-C に紫外イメージャーが搭載されるが、「あけぼの」以降、FUV 領域を撮像するイメージャーは欠落している。一方、諸外国では POLAR、IMAGE、TIMED 衛星等に FUV 領域のイメージャーやスペクトログラフが搭載され、主にオーロラや熱圏大気組成・ダイナミクスの研究に多くの成果を上げている。

2. 研究の目的

このように、現状では FUV 領域の撮像技術に関しては欧米に大きく水をあけられている状況である。先に述べたように、FUV 領域は地球及び地球型惑星の超高層大気を衛星からリモートセンシングするには最適な波長領域であり、その技術を我が国が持たないのは研究上の大きなハンディとなっている。それを返上するために、FUV イメージャーを開発する基礎技術力を獲得することが最終的な目的である。

本研究では FUV イメージャー開発の第一段階として FUV シュミットカメラ（図 1）の技術的ポイントとなるシュミット補正板の製作技術を確認する。FUV 領域で使える透過光学材料はいくつかの結晶に限られる。フッ化マグネシウム(MgF₂)はそれらの中でも透過率が比較的高く潮解性がない点で、シュミット補正板に最適な材料である。しかし、シュミット補正板は修正量が大きいため、砂擦り+ピッチ研磨による技術では現実的に

製作不可能である。これまでに行った基礎実験でダイヤモンド研削+磁性流体研磨で MgF₂ 基板を磨いて光沢面を出すことが可能であることがわかった。本研究では、実際の大きさに近い MgF₂ 基板を磨くことによって、MgF₂ シュミット補正板の製作技術を確認する。それには完成した補正板を評価するための光学系の設計と製作も含まれる。

3. 研究の方法

FUV 領域で使える MgF₂ シュミット補正板の製作技術を確認する。ダイヤモンド研削+磁性流体研磨で実際に MgF₂ 基板を磨く過程で、目的の光学面を製作する技術を開発する。また、完成した非球面補正板を評価するための球面レンズを組み合わせた光学系を設計し、実際に製作されたレンズを使用して補正板の面精度を評価する。

研究初年度は、磁性流体研磨による MgF₂ 研磨面の面精度を改良する。過去に実施した試作ではダイヤモンド研削+磁性流体研磨

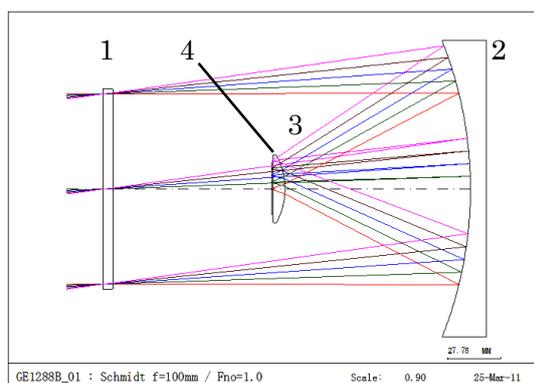


図 1 設計した真空紫外シュミットカメラの光路図。下に示したのは非球面形状がわかりやすいように光軸方向に 10 倍に拡大した補正板。

によって、切削痕を消し光沢面を出すことができることを確認した。しかし研磨面に十字模様の残差が現れた。この十字模様の残差は材料の結晶に原因があるのか、研磨装置に原因があるのかが切り分けられていない。そこで、初年度の試験では、この原因を調査し、それを取り除く方法を開発する。MgF₂ 結晶を研磨装置に取り付ける際に、取付方向に注意し、磁性流体研磨によってゆるい球面に磨く。取付方向を 20°程度回転させて同様に研磨して、十字模様に変化するかどうかで、原因が切り分けられる。原因がどちらにあるにせよ、十字模様が現れないような研磨条件を探す。最終的に、干渉計を使って面精度を検査し、λ/20(@633nm)より優れた面精度を達成することを目標とする。

シュミット補正板は非球面であるので、そのままでは干渉計を使った面精度の評価ができない。干渉計にかけられるようにするためには、シュミット補正板も含めたレンズ系でアプラナートレンズとなるようなレンズ系(ヌルレンズ)を組み合わせる必要がある。シュミット補正板の干渉計検査に使用するため、球面レンズを2~3枚を組み合わせたヌルレンズを設計する。

研究2年目は、前年度の設計に基づいて、シュミット補正板を評価するためのヌルレンズを製作する。

衛星搭載センサーの MgF₂ 補正板(φ=100mm)にできるだけ近い直径の MgF₂ 基板をシュミット補正板の非球面形状に磨く。φ=100mmの非球面を磁性流体研磨するには1000万円を超えるマシンタイムが必要との試算がある。本研究費ではそこまでの検証は不可能であるので、可能な限り大きい基板を磨くことで、少ないマシンタイムで大口径基板の研磨精度の検証を行う。

研究の最終年度は、干渉計を使ってシュミット補正板の面精度及び面粗度を検査する。検査時には前年度に製作したシュミット補正板とヌルレンズを組み合わせる。結果を考察し、効率よく必要な面精度を達成できる研磨方法を考案する。

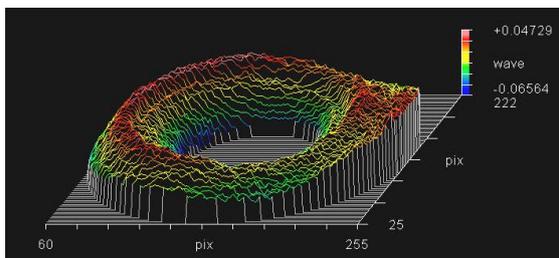


図2 高精度ダイレクト研削による評価用補正板の面形状残差。

3年間の研究成果をとりまとめて、公表する。

4. 研究成果

初年度の研究で、MgF₂の平面と球面の加工については要求される面精度と面粗度を達成できることがわかった。研究2年度目は、真空紫外シュミットカメラの要となる非球面 MgF₂ 補正板の製造技術を確認するため、非球面レンズの加工精度を試作により検証した。非球面の製作は面の傾斜が最も大きいところ及び研削量が最大になるところが特に困難となる。そこでフライトモデルの補正板と同程度の傾斜と研削量をもち、直径が60mmの補正板を設計した。それと同時に、試作した補正板を干渉計で評価するために、非球面補正板と組み合わせることで入射した平行光線を平行光線として出射するレンズ系を設計した。非球面補正板の製作には、昨年度の試験で平面及び球面の製作で精度と効率の点から有効性が確かめられた高精度ダイレクト研削を用いた。面評価には He-Ne レーザー光を用いたフィゾー型干渉計を使用し、できあがった非球面補正板の面精度と面粗度を測定した(図2)。その結果、面精度は観測波長135.6nmに対し、約λ/3(PV)、λ/25(rms)という値を達成できた。今回の試作は高精度ダイレクト研削のみを施したが、この面にさらに磁性流体研磨による仕上げ加工を加えれば、λ/4(PV)以下の高い面精度の達成が期待できる。また、面粗度はおよそλ/100が達成されており、こちらは十分に実用レベルであると考えられる。今回はフライトモデルの36%の面積を持つ補正板の試作に成功したので、フライトモデルの補正板製作は加工時間すなわちコストだけの問題である。2年度目までの研究で、本研究の目標とする真空紫外シュミットカメラの非球面補正板を製作する技術は確立できた。最終年度は、前年度までに得られた成果を論文としてまとめて、JAXA Research Report に公表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Taguchi, M., T. Nakamura, and J. Ono, Development of an MgF₂ aspheric corrector for a VUV Schmidt camera, JAXA-RR-11-004, 1-11, 2012, 査読有

〔学会発表〕(計5件)

- ① 中村哲也, 田口 真, 真空紫外シュミットカメラの補正板の開発, 第11回宇宙科学シンポジウム, 2011年1月6日, 相模原.

- ②中村哲也、田口 真、真空紫外シュミットカメラの補正板の開発、第 128 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、2010 年 11 月 2 日、那覇.
- ③中村哲也、田口 真、真空紫外シュミットカメラの補正板の開発、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 26 日、幕張.
- ④中村哲也、田口 真、真空紫外シュミットカメラの補正版の評価、第 126 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、2009 年 9 月 28 日、金沢.
- ⑤田口 真、Development of Finishing Process of MgF₂ Surfaces for a Far Ultraviolet Schmidt Camera、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、2009 年 5 月 21 日、幕張.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田口 真 (TAGUCHI MAKOTO)
立教大学・理学部・教授
研究者番号：70236404

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし