惑星望遠鏡 TOPS 搭載用 EUV 分光器の開発

豊田丈典¹, 吉岡和夫¹, 村上豪¹, 小川源太郎², 吉川一朗¹

1. 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

2. 東京大学 理学部 地球惑星物理学科

1. イントロダクション

1.1. 概要

惑星望遠鏡 TOPS は 2012 年に JAXA が打ち上げる予定の惑星観測用小型衛 星である。高度 700km の地球周回軌道から惑星や小惑星・恒星を定常観測する。 惑星の外圏大気を構成するイオンの輝線は波長 30.4nm から 130.4nm までの極 端紫外(EUV)領域に集中しており、これらを観測すれば希薄な惑星大気の流出量 や高密度プラズマの温度を定量することができる。TOPS 衛星の主な観測対象 は惑星から流出する大気と木星のイオ・トーラスである。

イオ・トーラスについては数例の断片的観測(Voyager, Cassini, Ulysses)があ る。観測された EUV 放射強度から電子温度が導出できるが、クーロン衝突を介 して電子に輸送されるエネルギーのみでは観測された電子温度を説明できない。 TOPS 衛星はイオ・トーラスの電子温度空間分布変動を世界で初めて観測し、 電子加熱機構の検証を可能にする。

惑星大気流出理論で最も不確定性が大きいのは「電離圏起源の低温イオンの 流出量」であり、現状ではオーダーの不確定性がある。TOPS 衛星ではこの流 出量をファクターの精度で定量する。また TOPS 衛星は大気流出の「上流から 下流まで」を一度に捉えることが可能であり、太陽風条件の変化に対する外圏 と電離大気の応答を検証することが出来る。

本研究では上記の観測を行うための要求性能を満たす TOPS 搭載用分光器の 検討を行った。既に開発実績のある検出器と一般的なトロイダル回折格子・反 射鏡を想定して検討した結果、仕様の異なる 2 台の分光器を使用する事で要求 性能を達成した。また検出器設置位置公差について簡単な見積りを行い、現実 的な製作精度の下で実現可能であることを確認した。

1.2. 分光器の概形

TOPS 搭載用 EUV 分光器を図 1.1.に示す。惑星の大気光は 2 回の反射で検出 器に至る設計である。極端紫外光を観測するには反射回数の少ない光学系使う 必要があるが、この点で図 1.1.に示した設計は有利である。



図 1.1. TOPS 搭載用 EUV 分光器の概形

1.3. 主鏡の仕様

図 1.2. に主鏡の仕様を示す。表面に CVD-SiC のコーティングを施した直径 200[mm]の非軸放物面鏡を仕様する。焦点距離は約 1600[mm]であるので、分 光器入射スリット上での 1[µm]は視野角約 7.79[arcsec]に相当する。図 1.3.に は主鏡のスポットダイアグラムを示す。表 1.1 には画角とエンサークルドエネ ルギー90%の直径の関係を示す。この表から、画角±210[arcsec]の範囲で収差 が 22[µm]以下に収まっているということが読みとれる。



図 1.2. EUV 分光器主鏡の仕様



図 1.3. 主鏡のスポットダイアグラム。横軸はデフォーカス量[mm]を、縦軸は入射平行光の画角 [arcsec]を示す。デフォーカス量が増加するほど、また画角が大きくなるほど収差が大きくなっ ていることがわかる。

表 1.1. 画角とエンサークルドエネルギー

	画角	on-axis	+25"	+50"	+105"	+210"
Encircled 90%の直径	Energy [μm]	4.9	4.4	6.1	11	22

2. 分光器に要求される性能

2.1. イオ・トーラス観測

TOPS によるイオ・トーラス観測のイメージを図 2.1.に示す。視野角 10"× 420"の範囲を空間分解能 10"×30"の空間分解能で観測する。空間分解能は「ス リット幅 + 分光器の波長方向収差」×「主鏡の収差 + 分光器の空間方向収差」 で決まる。

Cassini によるイオ・トーラスの EUV 観測スペクトルを図 2.2.に示す。電子 衝突励起による S や O の発光が観測されている。波長 64.2[nm]から 142.4[nm] までを波長分解能 0.5[nm]で観測すれば、主要な輝線を分離することができる。 観測された EUV 放射強度から背景電子温度を導出する。



図 2.1. イオ・トーラス観測のイメージ。水色の線は磁力線を、オレンジ色の線はガリレオ衛星 の軌道を表す。イオから放出されたイオンはイオの軌道に沿ってドーナツ状に分布している。 黄色い四角は TOPS の観測視野を表わす。



図 2.2. Cassini UVIS によるイオ・トーラス観測スペクトル[Steffl et al., 2004]。

2.2. 惑星大気流出観測

惑星大気流出観測のイメージを図 2.3.に示す。視野角 10"×100"の範囲を空間分解能 10"×10"で観測する。イオ・トーラス観測に比べて空間分解能が必要である一方、必要な観測視野は4分の1以下である。



図 2.3. 惑星大気流出観測のイメージ。黄色い四角が TOPS の観測視野を表す。

観測対象とする輝線を表 2.1.に示す。波長範囲 30.4[nm]から 130.4[nm]を波 長分解能 2.0[nm]で観測する。輝線同士の波長間隔が広いので、イオ・トーラ ス観測に比べて波長分解能の制約は緩い。

波長 [nm]	輝線	惑星	強度 [R]
30.4	He ii	地球 / 金星	1 / 0.6
46.5	Ne vii 金星 / 火星 / 水星 0.001 から0.003		0.001から0.003
58.4	Hei 地球/水星 5/0.1か		5/0.1から6
83.4	O ii	地球 / 金星 /火星	0.3 / 0.003から3 / 0.001から0.09
90.9	S ii	水星	0.01
108.6	N ii	金星 / 火星	0.001から0.9 / 0.003
121.6	Lyman-α	地球 / 金星 / 火星 / 水星	1000
130.4	0	金星 / 火星	0.5 / 0.1

表 2.1. 惑星大気流出観測で対象とする輝線

3. 光学設計

3.1. 回折格子の収差

収差とは光学系の「ボケ」の事である。ある光学系が理想的な結像性能をも っている場合、光学系の空間分解能は回折限界によって決まる。しかし現実に は光学系の収差の影響が大きく、収差の大きさとスリットなどの物理的遮蔽に よって空間分解能が決まる。よって、分光器の光学設計を行う際は収差が少な くなるよう設計パラメータを決めていく必要がある。

トロイダル回折格子の光学配置[Huber and Tondello, 1979]を図3.1.に示す。 トロイダル回折格子は刻線方向とそれに垂直な方向で曲率半径が異なる回折格 子である。入射光は刻線に垂直な方向(図 3.1. では紙面水平方向)に分散される ので、本稿ではこの方向を分散方向あるいは波長方向と呼ぶ。これに対し、刻 線方向(図 3.1. では紙面垂直方向)を空間方向と呼ぶ。

図 3.1.にあるように、回折格子の波長方向の曲率半径を直径とし、回折格子 の中心と接する円をローランド円と呼ぶ。ローランド円上に点光源を置いた場 合、分散された像の波長方向収差が最小となる点はローランド円上を空間方向 に延長した面(Spectral Focal Surface)上にのることが知られている。このとき、 空間方向の収差が最小となる点は回折格子の法線に垂直な平面(Spatial Focal Plane)上にある。

Spectral Focal Surface と Spatial Focal Plane の間に平面検出器を置いた 場合の光線追跡結果を図 3.2.に示す。計算には Mathematica の光線追跡パッケ ージ LensLab を使用した。波長方向と空間方向それぞれに収差があることがわ かる。例えば検出器を Spatial Focal Plane に重ねた場合、空間方向の収差は最 小となるが、Spectral Focal Surface から離れるため波長方向の収差が大きくな る。 回折格子の収差を小さくするには、Spectral Focal Plane と Spatial Focal Plane を近づける必要がある。そのためには回折格子の

● F値を小さくする (焦点距離を長くし、回折格子の面積を小さくする)

● スペクトル面の幅を小さくする (分散を大きくし、波長範囲を狭める) 必要がある。



図 3.1. トロイダル回折格子の光学配置を示している。回折格子には紙面垂直方向に刻線されて いるとする。回折格子の分散方向(紙面水平方向)の曲率半径を直径とし、回折格子の中心と接す る円をローランド円と呼ぶ。ローランド円上に点光源を置き回折格子によって分散・集光する と、分散方向の収差が最小となる点は必ずローランド円上 (Spectral Focal Surface) にのる。こ のとき、空間方向の収差が最小となる点は回折格子の法線に垂直な平面(Spatial Focal Plane)上 にある。



図 3.2. 平面検出器上での結像の例。Mathematica の光線追跡パッケージ LensLab による計算結 果である。空間方向と波長方向にそれぞれ収差がある。

3.2. 回折格子の分散と検出器

検出器として最有力候補にあがっているのは、マイクロチャンネルプレート とレジスティブアノードの組み合わせ(図 3.3.)である。これらは我々の研究グル ープにおいて Bepi-Colombo 国際水星探査計画に向けた開発実績がある。

マイクロチャンネルプレートの l[pixel]の大きさは約 $30[\mu m]$ 以上である。よって波長分解能 $\Delta \lambda$ [nm]を達成するには、検出器上での分散 D [nm/pixel]が

 $D < \Delta \lambda/2 \quad [nm/pixel]$ $D < \lambda/2/30 \quad [nm/\mu m]$

でなければならない。

回折格子の分散と溝本数について考える。回折格子への入射角 α [deg]と波長 λ [nm]の光の分散角 β_{λ} [deg]・回折の次数 m (= 1)・溝本数 g [grooves/mm] をおく(図 3.4.)。回折の式より

$$\beta_{\lambda} = \sin^{-1}[\sin(\alpha) - m \times g \times \lambda]$$

である。溝本数が多いほど検出器上での分散は小さい値となる。よって、入射 角・観測波長域・分解能を設定すると溝の最低本数が決まる。



図 3.3. マイクロチャンネルプレートの外観



図 3.4. 光の回折格子に対する入射角と分散角。入射角・観測波長域・波長分解能を設定すると、 溝の最低本数が決まる。

3.3. 制約条件

分光器を設計する際に考慮に入れなければならない制約条件を列挙すると、

- 前置光学系は F8 である(焦点距離は 1.6 [m]なので、入射スリット上での 1 [μm]は約 7.79 [arcsec]に相当する)。
- 分光器の全長は約700 [mm]以下に抑えなければならない。

- 検出器上での分散 D < 波長分解能Δλ / 60 [nm/μm]
- イオ・トーラス観測用
 - > スリット幅 + 波長方向の収差 < 150 [µm] → 波長分解能 0.5 [nm] を達成する。
 - > 空間方向収差 + 主鏡の収差 < 117 [µm] → 空間分解能 30 [arcsec] を達成する。
- 惑星大気流出観測用
 - > スリット幅 + 波長方向の収差 < 300 [µm] → 波長分解能 2 [nm]を 達成する。
 - > 空間方向収差 + 主鏡の収差 < 39 [µm] → 空間分解能 10 [arcsec] を達成する。
- 回折格子の直径は100 [mm]以下。溝本数は1800 [本/mm]以下。
- となる。これらを満たしつつ要求性能を達成するような分光器を設計した。

3.4. 制約条件を満たす設計

図 3.5.に TOPS 搭載用 EUV 分光器の光学配置を示す。惑星大気光は主鏡を 含めて 2 回の反射で検出器に至る。設計パラメータは表 3.1.に示す。いずれの 設計も前述した制約条件を満たし、かつ要求性能を達成している。



図 3.5. TOPS 搭載用 EUV 分光器の光学配置

		イオ・トーラス観測用	惑星大気観測用
	回折格子直径 [mm]	90	55
回折格子溝本数 [grooves/mm]		1000	800
回折格子曲率半径	分散方向 [mm]	600	380
	空間方向 [mm]]	596.3	378.9
10	LA [mm]	596.8	378.9
	LB [mm]	599.5	379.7
	α [deg]	5.9	3.7
検出器有効領域	分散方向 [mm]	48	31
	空間方向 [mm]	3.5	1
入射スリットの寸法	波長方向 [um]	78	78
	空間方向 [um]	3276	780
	観測波長域 [nm]	64.2 - 142.4	30.4 - 130.4
	波長分解能 [nm]	0.5	1.3
	空間分解能 [arcsec]	22	8

表 3.1. TOPS 搭載用 EUV 分光器の設計パラメータ

3.5. イオ・トーラス観測用分光器

図3.5.にイオ・トーラス観測用分光器(設計パラメータは表3.1.参照)のスポッ トダイアグラムを計算した結果を示す。この結果から、空間・波長方向の収差 が3.3.節の制約条件を満たしていることを定量的に確かめることができる。収 差の大きさを評価した結果を図3.8.と図3.9.に示す。本設計は波長範囲64.2 [nm]から142.4 [nm]の範囲で、空間分解能22 [arcsec]・波長分解能0.5 [nm] を達成している。



図 3.7. イオ・トーラス観測用分光器のスポットダイアグラム。波長 74.2 [nm], 134.2 [nm] 付 近で波長方向の収差が小さくなっている様子がわかる。



図 3.8. 空間方向収差と主鏡の収差の合計を波長に対してプロットしたもの。値が 117 [µm]以 下の範囲で空間分解能 30 [arcsec]を達成する。



図 3.9. 波長方向収差とスリット幅の合計を波長に対してプロットしたもの。値が 150 [µm]以 下の範囲で波長分解能 0.5 [nm]を達成する。

3.6. 惑星大気流出観測用分光器

図3.10.に惑星大気流出観測用分光器(設計パラメータは表3.1.参照)のスポッ トダイアグラムを計算した結果を示す。この結果から、空間・波長方向の収差 が3.3.節の制約条件を満たしていることを定量的に確かめることができる。収 差の大きさを評価した結果を図3.11.と図3.12.に示す。本設計は波長範囲30.4 [nm]から130.4 [nm]の範囲で、空間分解能 10 [arcsec]・波長分解能 1.3 [nm] を達成している。



図 3.10. 惑星大気流出観測用分光器のスポットダイアグラム。



図 3.11. 空間方向収差と主鏡の収差の合計を波長に対してプロットしたもの。値が 39 [µm]以 下の範囲で空間分解能 10 [arcsec]を達成する。



図 3.12. 波長方向収差とスリット幅の合計を波長に対してプロットしたもの。値が 300 [µm] 以下の範囲で波長分解能 2.0 [nm]を達成する。

3.7. 検出器位置の製作公差

前節で要求性能を満たす光学系の設計を示したが、この設計を実際に製作で きることを確認する必要がある。一般に金属加工の製作精度は数[µm]程度なの で、検出器の位置が設計より数[µm]ずれても分光器が要求性能を達成したまま であることを確認できればよい。イオ・トーラス用と惑星大気流出観測用のそ れぞれについて、検出器位置を前後させて収差を計算した結果を図 3.13.~図 3.16.に示す。要求性能を満たす検出器位置はイオ・トーラス用で ±50 [µm]、 惑星大気流出観測用で ±200 [µm]の範囲に及ぶ。よって、本研究の設計は現実 的な製作精度の下で製作可能である。



図 3.13. イオ・トーラス観測用分光器における、検出器のデフォーカスと空間方向収差の関係。 波長 64.2, 103.3, 142.4 [nm]について画角を変えて計算した。



図 3.14. イオ・トーラス観測用分光器における、検出器のデフォーカスと波長方向収差の関係。 波長 64.2, 103.3, 142.4 [nm]について画角を変えて計算した。要求される波長分解能(0.5 nm) を達成している範囲(図で赤く網かけされた範囲)は 100 [µm]である。よって許容される製作公 差は±50 [µm]となる。



図 3.15. 惑星大気流出観測用分光器における、検出器のデフォーカスと空間方向収差の関係。 波長 30.4, 83.4, 130.4 [nm]について画角を変えて計算した。要求される空間分解能(10 arcsec) を達成している範囲(図で赤く網かけされた範囲)は 400 [µm]に及ぶ。よって許容される製作公 差は±200 [µm]となる。



図 3.16. 惑星大気流出観測用分光器における、検出器のデフォーカスと波長方向収差の関係。 波長 30.4, 83.4, 130.4 [nm]について画角を変えて計算した。

4. 光量見積り

4.1. 観測対象の光量

TOPS が観測する対象候補の「大きさ」と「明るさ」を図 4.1.に示す。図 4.1. の横軸は直径 200 [mm]の主鏡に入射してくる単位時間あたりの光子数で、縦軸 は対象の空間スケールを視野角で示している。観測対象の大きさはほとんどが 50 [arcsec]以下であるということが分かる。



図 4.1. TOPS 観測対象の「大きさ」と「明るさ」

4.2. 分光器の検出効率

分光器の検出効率は鏡面のコーティングや回折格子の溝型・MCPの光電物質 等によって変わる。実コーティングは CVD-SiC、回折格子をラミナー型、MCP の光電物質を CsI と仮定して検出効率を理論的に計算した。結果を図 4.2.と図 4.3.に示す。全体の検出効率は約 1%程度であり、10"×10"の視野で 1[R]の対象 を 1 時間観測した場合に 10 カウント程度を得ることができる。



図 4.2. 分光器の検出効率 (QE: 光電物質の量子効率、Primary mirror: 主鏡の反射率、Grating: 回折効率、Total: 全体の検出効率)。



図 4.3. 観測視野の大きさと検出器のカウント数の関係

5. まとめ

既存の技術を想定して TOPS 搭載用 EUV 分光器の光学設計を行い、要求性能 を達成した。また設計した光学系が現実的な製作公差の下で製作可能であるこ とを確認した。さらに、1[R]の光源を積分時間1時間で10カウント程度で観測 できるという見積結果を得た。

引用文献

- Huber, M. C. E., G. Tondello, Stigmatic performance of an EUV spectrograph with a single toroidal grating, *Applied Optics*, 18, 3948-3953, 1979
- Steffl, A. J., F. Bagenal, A. I. F. Stewart, Cassini UVIS observations of the Io plasma torus. II. Radial variations, *ICARUS*, **172**, 91-103, 2004