

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### ひさき衛星搭載の極端紫外分光撮像装置 (EXCEED) の 回折格子の性能評価

Performance evaluation of the grating used in the extreme ultraviolet spectroscopy  
(EXCEED) on the HISAKI satellite

疋田 伶奈, 吉岡 和夫, 村上 豪,  
桑原 正輝, 吉川 一朗

Reina HIKIDA, Kazuo YOSHIOKA, Go MURAKAMI,  
Masaki KUWABARA, Ichiro YOSHIKAWA

2017年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# ひさき衛星搭載の極端紫外分光撮像装置(EXCEED)の 回折格子の性能評価

疋田 伶奈<sup>\*1</sup>, 吉岡 和夫<sup>\*1</sup>, 村上 豪<sup>\*2</sup>,  
桑原 正輝<sup>\*1</sup>, 吉川 一朗<sup>\*1</sup>

## Performance evaluation of the grating used in the extreme ultraviolet spectroscopy (EXCEED) on the HISAKI satellite

By

Reina HIKIDA<sup>\*1</sup>, Kazuo YOSHIOKA<sup>\*1</sup>, Go MURAKAMI<sup>\*2</sup>,  
Masaki KUWABARA<sup>\*1</sup>, Ichiro YOSHIKAWA<sup>\*1</sup>

**Abstract:** EXCEED (EXtreme ultraviolet spectroscopy for Exospheric Dynamics) observes the extreme ultraviolet radiation from planetary atmosphere on the HISAKI satellite since its launch in September 2013. The laminar-type diffraction grating is used in the instrument. For the laminar-type grating, it is known that there are no secondary diffracted lights in theory. However, the contamination of secondary lights is indicated from the data obtained by EXCEED. Therefore, the evaluation of the diffraction efficiency of the secondary lights is necessary for scientific analysis using data obtained by EXCEED. In this work, we evaluate the diffraction efficiency of the secondary lights by analyzing the spectral data obtained by EXCEED. The results are compared with the laboratory measurements by using the spare model (qualification model).

**Keywords:** Grating, Secondary Light, Extreme Ultraviolet, EXCEED

## 概 要

EXCEED (EXtreme ultraviolet spectroscopy for Exospheric Dynamics) は、ひさき衛星に搭載され、地球周回軌道から惑星大気の観測を行っている極端紫外分光撮像装置である。EXCEEDに用いられているラミナー回折格子では、理論的には偶数次の回折光が生じないことが知られている。しかし、EXCEEDの観測データによると、二次光の混入が確認されている。そこで我々は、観測データを用いた解析と、EXCEEDに搭載された回折格子とほぼ同じ仕様の回折格子 (QM: qualification model) を用いた実験によって、一次光と二次光の回折効率の比を評価した。その結果、一次回折効率に対する二次回折効率の比は、EXCEEDに搭載された回折格子 (FM: flight model) に波長58.4 nm, 68.0 nmの光を入射した場合はともに14%程度であり、QMに波長58.4 nm, 67.2 nm, 73.5 nmの光を入射した場合はそれぞれ42%, 28%, 22% 程度であることがわかった。

---

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-012/0001

<sup>\*</sup> 平成 28 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2016)

<sup>\*1</sup> 東京大学 (The University of Tokyo)

<sup>\*2</sup> 宇宙科学研究所 太陽系科学研究所 (Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical (ISAS))

## 1. はじめに

EXCEED (EXtreme ultraviolet spectroSCOpe for Exospheric Dynamics) は、ひさき衛星に搭載されている分光撮像装置である。主な観測対象の一つは木星周辺の極端紫外光である。木星磁気圏には、衛星イオから放出される硫黄酸化物等の火山ガスが紫外線照射や電荷交換反応を経て電離することで、イオの公転軌道付近にイオプラズマトーラス<sup>1)</sup>が形成されている。EXCEED により、イオプラズマトーラスや、火山ガスを由来とする原子の発する極端紫外光が観測されてきた。なお、ひさき衛星は軌道高度 1000km 程度の地球周回衛星であるため、EXCEED の観測結果には常に地球大気光が含まれている。

EXCEED の光学配置は、波長 52-148 nm の光の一次光の検出のために最適化されている。EXCEED に用いられているラミナー回折格子では、理論的には偶数次の回折光が生じないことが知られている。しかし、これまでの EXCEED の地球大気光の観測データによると、一次光の検出位置への二次光の混入が確認されている<sup>2)</sup>。このことから、木星観測時には、135.6 nm (酸素原子の輝線) の一次光の検出位置へ、68.0 nm (硫黄二価イオンの輝線) の二次光が混入していると考えられる。同様に、140.5 nm (硫黄三価イオンの輝線) の一次光の検出位置へ 70.3 nm (硫黄二価イオンの輝線) の二次光が混入している可能性がある。したがって、木星磁気圏に存在する物質を発光源とする輝線の発光強度を求めるためには、一次光と二次光の回折効率の比を調べる必要がある。

そこで我々は、EXCEED の観測データを用いた解析と、EXCEED に搭載された回折格子とほぼ同じ仕様の回折格子 (QM: qualification model) を用いた実験によって、一次光と二次光の回折効率の比を評価した。本論文ではそれらの結果について報告する。

## 2. EXCEED の光学設計

### 2.1. EXCEED の構成

EXCEED は、直径 200 mm の放物面反射鏡、刻線領域が直径 60 mm の反射型回折格子、二次元光検出器で構成された分光撮像装置である。図 1 に光路図の概略を示す。鏡の反射面にはシリコン・カーバイドを化学蒸着し (CVD-SiC)、極端紫外光の反射率を高めている。鏡で反射された光はスリットを通り、表面がトロイダル形状である反射型回折格子へ入射する。回折光が検出器上に集光し、一軸は波長、もう一軸は空間情報を表す二次元スペクトルが得られる。回折格子の表面には鏡と同様に CVD-SiC を施している。回折格子の外観を図 2 に示す。

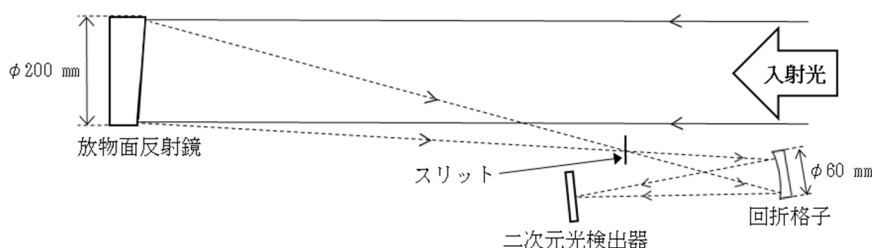


図 1. EXCEED の光路図の概略.

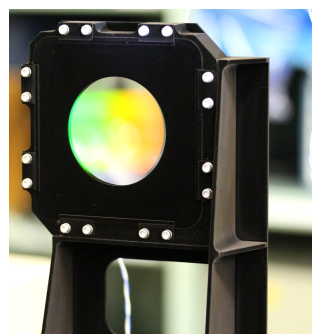


図 2. 回折格子の外観.

## 2.2. 回折格子の理論特性

波長 $\lambda$ の入射光の  $m$  次の回折角  $\beta_m$  は、入射角を  $i$ 、回折格子の溝の周期を  $d$  とおくと、式(1)を満たす。

$$m\lambda = d(\sin i + \sin \beta_m) \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

なお、EXCEEDの光学設計では、光は回折格子の溝の長さ方向に垂直な断面（以下では溝の断面と呼ぶ）に平行に入射するため、本論文でも同様の状況を考えている。

EXCEEDには、溝の断面が矩形波状であるラミナー型回折格子が使用されている。ラミナー回折格子の溝の断面の模式図を図3に示す。ラミナー回折格子の  $m$  次の回折効率  $I_m$  は、溝の深さを  $u$ 、本数を  $N$  とおくと、式 (2) を満たす<sup>3)</sup>。

$$I_m \propto N^2 \left\{ \frac{\sin(m\pi/2)}{m\pi/2} \right\}^2 \cos^2 \left\{ \frac{\pi u}{\lambda} (\cos i + \cos \beta_m) + \frac{m\pi}{2} \right\} \quad (2)$$

なお、実際には  $I_m$  は溝のデューティ比 ( $a/d$ ) に依存するが、ここでは簡単のため  $d = 2a$  としている。式 (2) から、ラミナー回折格子では理論的には偶数次の回折光は生じないことがわかる。

しかし、実際は加工精度に限界があるため、溝の断面の形状は完全な矩形にはなりえず、丸みを帯びていると考えられる。そのため、ラミナー回折格子でも、図4に溝の断面の模式図を示した正弦波状回折格子のように、偶数次の回折光が生じることが予想される。正弦波状回折格子の  $m$  次の相対回折効率  $I_m$  は、式 (3) のように表される<sup>4)</sup>。

$$I_m \propto N^2 \left\{ \frac{1 + \cos(i - \beta_m)}{\cos i + \cos \beta_m} \right\}^2 (H_1^2 + H_2^2) \sin^2 X_m \quad (3)$$

なお、 $H_1, H_2, X_m$  は以下を満たす値である。

$$H_1 = \frac{1}{X_m} \left\{ 1 - \frac{Y_m^2}{4} + \frac{Y_m^4}{64} + \dots \right\} + \frac{X_m}{4\pi^2 - X_m^2} \left\{ \frac{Y_m^2}{4} - \frac{Y_m^4}{48} + \dots \right\} + \frac{X_m}{16\pi^2 - X_m^2} \left\{ -\frac{Y_m^4}{192} + \dots \right\} + \dots$$

$$H_2 = \frac{X_m}{\pi^2 - X_m^2} \left\{ Y_m - \frac{Y_m^3}{8} - \frac{Y_m^5}{192} \dots \right\} + \frac{X_m}{9\pi^2 - X_m^2} \left\{ -\frac{Y_m^3}{24} - \dots \right\} + \frac{X_m}{25\pi^2 - X_m^2} \left\{ -\frac{Y_m^5}{1920} + \dots \right\} + \dots$$

$$X_m = \frac{\pi d}{\lambda} (\sin i + \sin \beta_m), \quad Y_m = \frac{\pi u}{\lambda} (\cos i + \cos \beta_m)$$

式 (3) から、正弦波状回折格子では偶数次の回折光が生じることがわかる。

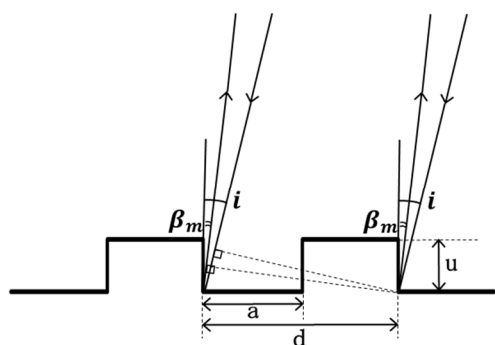


図3. ラミナー回折格子の溝の断面の模式図.

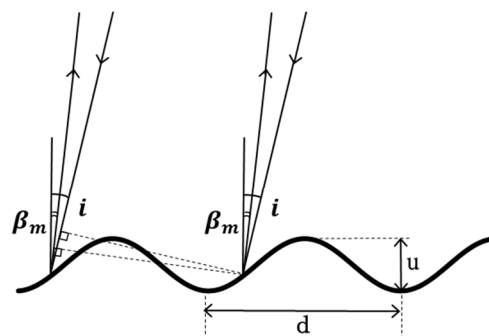


図4. 正弦波状回折格子の溝の断面の模式図.

### 3. EXCEED の観測結果

EXCEED には、主に二種類の観測モードがある。一つは惑星を観測するモードであり、もう一つは、視野を惑星方向から 5 分角だけ外して地球大気光のみを観測するモードである。なお、EXCEED は軌道高度 1000 km 程度の地球周回衛星に搭載されているため、惑星観測モードにおいても観測結果には地球大気光が含まれている。

図 5 に EXCEED の地球大気光観測モードで得られたスペクトルの観測例を示す。2014 年 1 月の地球大気光観測で得られたデータを用いた。横軸は入射光の波長を、縦軸は空間的広がりを表す。地球大気光は視野全体に広がっているため、ダンベル型のスリット形状<sup>9)</sup>が検出器面に反映されている。図 5 からは、ヘリウム原子の輝線 (58.4 nm) の二次光が 116.8 nm 付近に混入していることが確認できる。図 6 に、58.4 nm と 116.8 nm の検出位置付近のカウントレートの散布図を示す。各データ点は、図 5 の赤線で囲われた領域内のカウントレートの 12 分ごとの平均値を表す。両者の相関係数は 0.999 であり、強い相関があることがわかった。58.4 nm のカウントレートに対する 116.8 nm のカウントレートの割合は 14% 程度であった。

なお、波長 116.8 nm には地球大気に含まれる窒素原子の輝線があることが知られている。図 7 に示した MSIS モデル<sup>6),7),8)</sup>を用いた計算結果によると、高度 1000 km では窒素原子の密度はヘリウム原子の密度の 1/10000 倍程度である。過去のロケットの観測結果によると、窒素原子の密度がヘリウム原子の密度の 1/200 倍以上である高度 600 km 以下においても、窒素原子の 116.8 nm の発光強度は 58.4 nm の発光強度の半分程度である<sup>9)</sup>。したがって、高度 1000km での窒素原子の 116.8 nm の発光強度は He 58.4 nm の発光強度の 1% 以下だと考えられるため、EXCEED によって得られたスペクトルの 116.8 nm 付近の光の 9 割以上は 58.4 nm の二次光であると考えられる。

また、図 8 に EXCEED によって得られたイオプラズマトーラスのスペクトルの観測例を示す。図 8 から、イオプラズマトーラスに含まれる硫黄二価イオンの輝線 (68.0 nm) の二次光が 136.0 nm 付近に混入していることが確認できる。図 9 に、68.0 nm と 136.0 nm の検出位置付近のカウントレートの散布図を示した。両者の相関関係を明らかにするため、イオプラズマトーラスの供給源であるイオの火山活動が活発化し、輝線の発光強度の変化が激しくなった 2015 年 1 月から 5 月まで<sup>10)</sup>のデータを用いた。各データ点は、図 8 の赤線で囲われた領域内のカウントレートの 1 日ごとの平均値を表す。両者の相関係数は 0.989 であり、強い相関があることがわかった。68.0 nm のカウントレートに対する 136.0 nm のカウントレートの割合は 14% 程度であった。なお、136.0 nm 付近には酸素原子の輝線 (135.6 nm) があるが、過去の探査機の分光観測によるとイ

オ起源の酸素原子の発光強度は 68.0 nm の 1/100 以下であるため<sup>11)</sup>, EXCEED によって得られたスペクトルの 136.0 nm 付近の光は, ほぼ 68.0 nm の二次光だと考えられる。

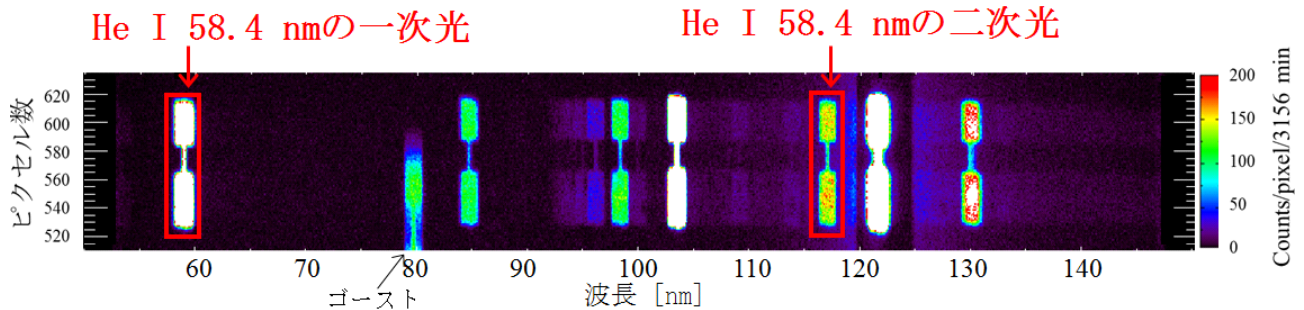


図 5. EXCEED の地球大気光観測モードで得られたスペクトルの例。

横軸は波長, 縦軸は空間的広がりを表す。

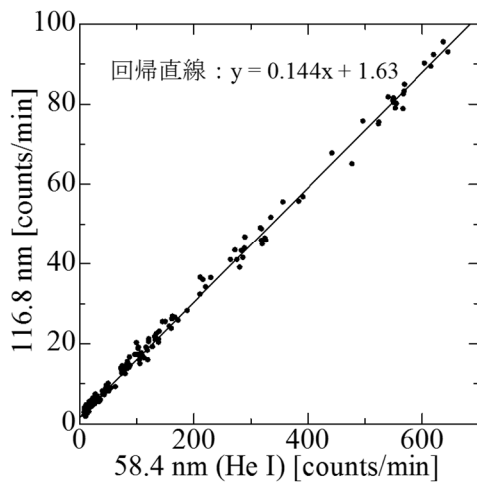


図 6. 58.4 nm と 116.8 nm の検出位置付近のカウントレートの散布図。

各データ点は, 図 5 の赤線で囲われた領域内のカウントレートの 12 分ごとの平均値を表す。

回帰直線の傾きは  $0.144 \pm 0.001$  だった。

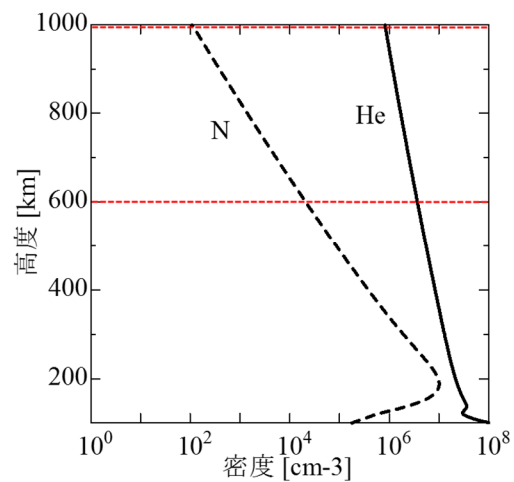


図 7. MSIS モデル<sup>6),7),8)</sup>による地球大気中のリヘウム原子と窒素原子の密度の高度分布。

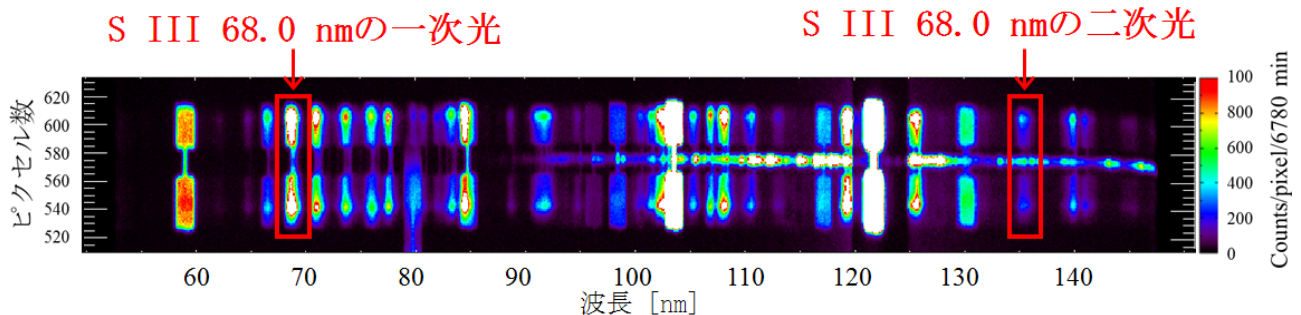


図 8. EXCEED によって得られたイオプラズマトーラスのスペクトルの例. EXCEED は軌道高度 1000km 程度の地球周回衛星に搭載されているため, 観測結果には常に地球大気光が含まれている。



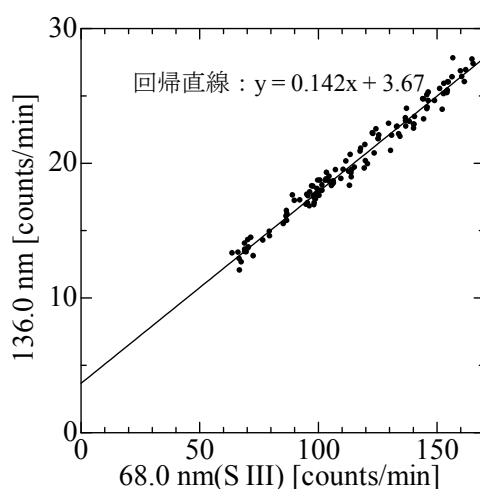


図 9. 68.0 nm と 136.0 nm の検出位置付近のカウントレートの散布図.

火山活動が活発化し、輝線の発光強度の変化が激しくなった時期（2015 年 1 月～5 月）のデータを用いた。

各データ点は、図 8 の赤線で囲われた領域内のカウントレートの 1 日ごとの平均値を表す。

回帰直線の傾きは、 $0.142 \pm 0.002$  だった。

#### 4. 回折効率測定の概要

EXCEED に搭載された回折格子（FM：flight model）とほぼ同じ仕様の回折格子（QM）を用いて、二次光と一次光の回折効率を測定した。表 1 に、FM と QM の仕様についてまとめた。両者の仕様は、溝の深さとデューティ比以外は同じである。

EXCEED の光学配置は、波長 52-148 nm の光の一次光の検出のために最適化されているため、波長 26-74 nm の光の二次光が観測結果に混入している可能性がある。したがって、本測定では波長 58.4 nm, 67.2 nm, 73.5 nm の光を入射して、それぞれの回折効率を測定した。

図 10 に回折効率測定の実験構成を示す。光源には、ガスフローランプを用いた。測定波長に応じてヘリウム、アルゴン、ネオンを発光させ、分光器で波長を選択した。入射光は分光器の出射スリットおよびチェンバー入口に設置されたピンホールによって平行化した。回折格子に対する光の入射角は、EXCEED の設計と同じ 10.4 度とした。検出器にはマイクロチャネルプレートを用いた。回転ステージを用いて検出器と回折格子をそれぞれ独立に回転させることで、各波長の光の各次数の回折効率を測定した。なお、検出器は、入射光がチェンバーへ導入される高さに設置し、回折光が検出器で検出されることで、入射光が溝の長さ方向に対して垂直であることを確認した。表 1 に、各波長の光の回折角を示す。

なお、2011 年には、上記と同様の条件で FM と QM の一次光の回折効率の測定を行っている。QM は、その後 5 年間、デシケータ中で窒素雰囲気の下、保管していた。

表 1. FM と QM の溝の仕様.

	FM	QM
深さ	21 nm	22 nm
デューティ比	0.41	0.32
本数	1800.0 lines/mm	1800.0 lines/mm
刻線領域	φ 60 mm	φ 60 mm

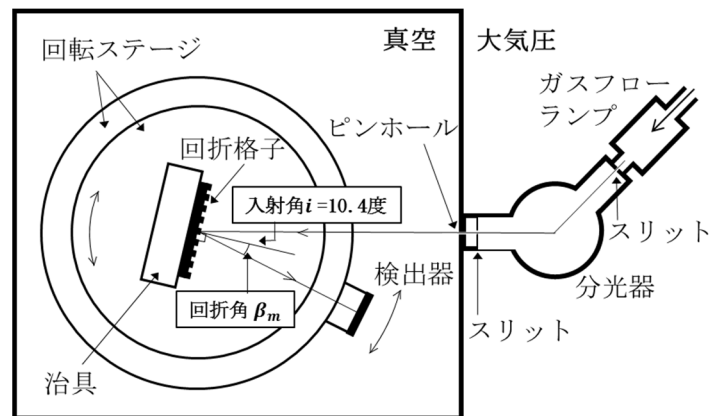


図 10. 回折効率測定の実験構成.

表 2. 波長  $\lambda$  の光の  $m$  次の回折角  $\beta_m$  (度)

$\lambda \backslash m$	1	2
58.4 nm	5.3	0.7
67.2 nm	3.4	2.5
73.5 nm	2.8	2.9

## 5. 測定結果と考察

### 5.1. 二次光の発生

本測定で得られた二次回折効率の一次回折効率に対する比を、図 11 に赤い点で示した。QM に波長 58.4 nm, 67.2 nm, 73.5 nm の光が入射した際は、それぞれ一次光に対して二次光が 42%, 28%, 22%程度生じていることがわかった。ただし、実験設備の事情により、67.2 nm と 73.5 nm の光の二次回折効率の測定では、入射角をそれぞれ 11.4 度、12.4 度とした。そのため、回折効率の入射角依存性を測定し、結果を図 12 に示した。入射角依存性は 10.4 度付近において非常に低いため、本測定で十分な性能評価ができることを確認した。

理論上は生じないはずの二次光が生じている原因として、回折格子の反射面の粗さやトロイダル面形状の歪みなどの他に、二章で述べたように、加工精度の限界により溝の断面が完全な矩形でなく丸みを帯びてい



ることが考えられる．そこで，溝の断面が丸みを帯びている極端な例として図 11 に赤実線で示した正弦波状回折格子の理論値と，本測定で得られた結果を比較する．なお，ここでいう正弦波状回折格子の理論値とは，溝の深さ  $u$  と周期  $d$  を QM と同じ値として式 (3) から計算した，二次回折効率の一次回折効率に対する比である．ラミナー回折格子の理論値は零であることから，図 11 より，QM の実測値は，ラミナー回折格子の理論値と正弦波状回折格子の理論値の間の値をとっていることがわかる．したがって，溝の断面が丸みを帯びていることは，本測定で二次光が生じた原因の一つとして挙げられる．

## 5.2. EXCEED の観測データと QM 測定によって得られた回折効率比の差

図 11 に，三章で述べた EXCEED の観測データから得られた値を黒い点で示した．QM 測定によって得られた値は，EXCEED の観測データから得られた値と比べて大きいことがわかる．両者の差の原因の一つとして，QM と FM では溝の深さとデューティ比が異なることが挙げられる．

式 (3) からわかるように，正弦波状回折格子の回折効率の理論値は，溝の深さに依存する．したがって，実際の QM と FM でも，溝の深さの違いによって一次回折効率に対する二次回折効率の比が異なると考えられる．図 11 に黒実線で示した，溝の深さを FM と同じ値とした場合の正弦波状回折格子の理論値と，溝の深さを QM と同じ値とした場合の理論値を比べると，確かに後者の方が大きい．したがって，QM と FM の溝の深さの違いは，本測定によって得られた値が EXCEED の観測データから得られた値より大きい値となっている原因の一つだと考えられる．

## 5.3. 窒素雰囲気下における回折格子の安定性

図 13 から明らかなように，5 年前と今回の QM の一次回折効率の測定結果の差は 6% 以内であり，有意な変化が見られない．この結果は，一般的なデシケータ内での窒素雰囲気下の保管によって，CVD-SiC を施した回折格子の安定性を十分保つことができることを示している．

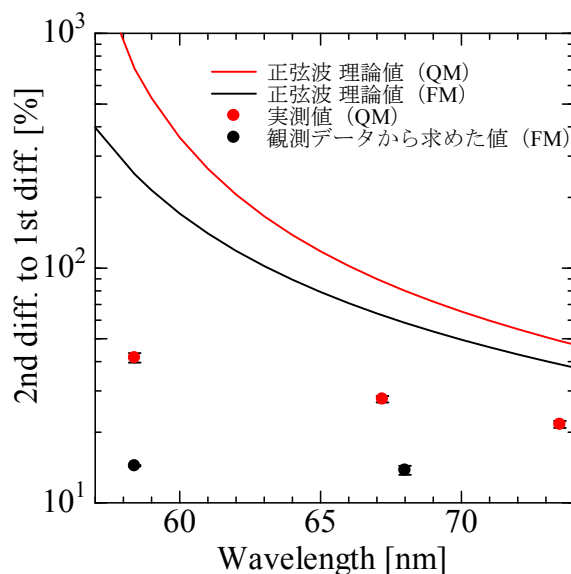


図 11. 一次回折効率に対する二次回折効率の比．

赤線と黒線は，溝の深さと周期をそれぞれ QM，FM の値とした場合の正弦波状回折格子の理論値である．

赤い点は QM の測定結果である．黒い点は，三章で述べた EXCEED の観測データから求めた値である．

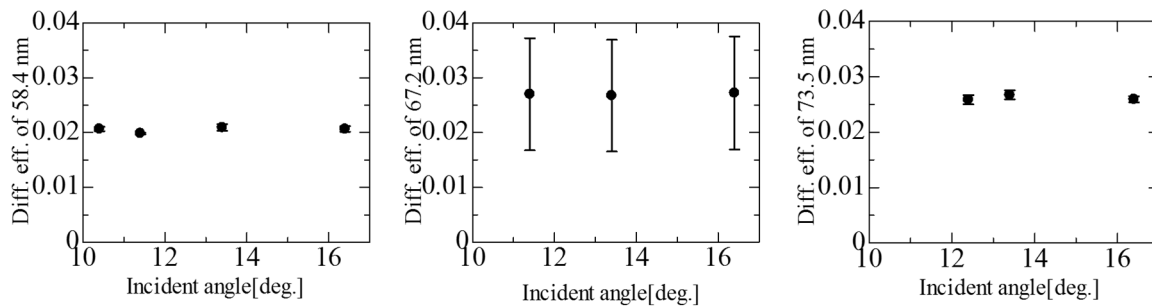


図 12. 二次回折効率の入射角依存性.

左から順に、波長 58.4 nm, 67.2 nm, 73.5 nm の光を入射した結果である.

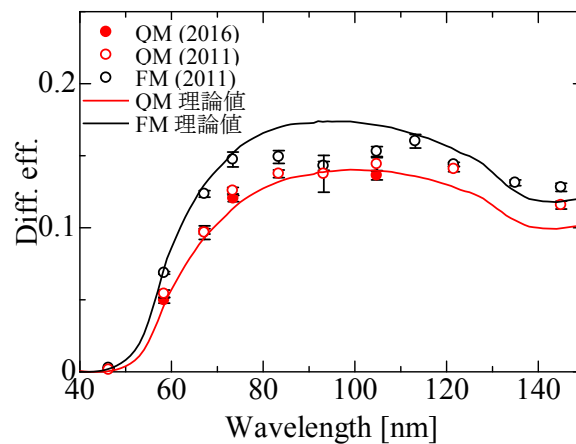


図 13. QM と FM の一次回折効率. 赤線と黒線は、溝の深さと周期をそれぞれ QM, FM の値とした場合のラミナー回折格子の理論値である. 赤で塗りつぶされた点は、本測定によって得られた値である.

赤, 黒で縁取られた点は、それぞれ QM, FM の 5 年前の測定結果である.

## 6. まとめ

我々は、EXCEED の観測データを用いた解析と、QM を用いた実験によって、一次光と二次光の回折効率の比を評価した。その結果、一次回折効率に対する二次回折効率の比は、FM に波長 58.4 nm, 68.0 nm の光が入射した場合は 14% 程度であり、QM に波長 58.4 nm, 67.2 nm, 73.5 nm の光が入射した場合はそれぞれ 42%, 28%, 22% 程度であることがわかった。これらの結果から、ラミナー回折格子でも二次光が生じており、その強度は入射光の波長と回折格子の溝の深さとデューティ比に依存することが確かめられた。EXCEED のデータから各輝線の発光強度を求める際には、その検出位置への二次光の混入の有無に注意する必要がある。

## 参考文献

- [1] N. Thomas, F. Bagenal, T. W. Hill, and J. K. Wilson, The Io neutral clouds and plasma torus, in *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, edited by F. Bagenal, T. E. Dowling, and W. B. McKinnon, Univ. Press, Cambridge, U. K., 2004, pp. 561–592.
- [2] I. Yoshikawa, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, N. Terada, T. Kimura, M. Kuwabara, K. Fujiwara, T. Hamaguchi, and H. Tadokoro, Extreme ultraviolet radiation measurement for planetary atmospheres/magnetospheres from the Earth-orbiting spacecraft (extreme ultraviolet spectroscopy for exospheric dynamics: EXCEED), *Space Sci. Rev.*, 184, 2014, pp. 237-258.
- [3] 工藤恵栄 ; 「分光の基礎と方法」, オーム社, 1985 年 7 月, pp. 383.
- [4] 工藤恵栄 ; 「分光の基礎と方法」, オーム社, 1985 年 7 月, pp. 381.
- [5] K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, T. Kimura, K. Uemizu, K. Uji, I. Yoshikawa, The extreme ultraviolet spectroscopy for planetary science, EXCEED, *Planet. Space Sci.*, 85, 2013, pp. 250-260.
- [6] K. Labitzke, J. J. Barnett, and B. Edwards (eds.), *Handbook MAP 16, SCOSTEP*, University of Illinois, Urbana, 1985.
- [7] A. E. Hedin, Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere, *J. Geophys. Res.* 96, 1991, 159.
- [8] J.M. Picone, A.E. Hedin, D.P. Drob, and A.C. Aikin, NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 2002, 1468.
- [9] R. R. Meier, Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere, *Space Sci. Rev.*, 58, 1991, pp. 1-185.
- [10] M. Yoneda, M. Kagitani, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, and S. Okano, Brightening event seen in observations of Jupiter's extended sodium nebula, *Icarus*, 261, 2015, pp.31-33.
- [11] A. Steffl, and F. Bagenal, A. I. F. Stewart, Cassini UVIS observations of the Io plasma torus. II. Radial variations , *Icarus*, 172, 2004, pp. 91-103.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-16-012

JAXA Research and Development Report

ひさき衛星搭載の極端紫外分光撮像装置 (EXCEED) の回折格子の性能評価

Performance evaluation of the grating used in the extreme ultraviolet spectroscopy (EXCEED) on the HISAKI satellite

---

発 行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発 行 日 平成29年2月1日  
電 子 出 版 制 作 松枝印刷株式会社

©2017 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

