

UVSAT 搭載用紫外域グリズムの試作

山口朝三・中桐正夫・渡辺鉄哉・小平桂一

西 恵三・家 正則・尾中 敬・田中 浩

Test Manufacturing of Grism Designed for
UVSAT Spectral Survey Project

by

A. Yamaguchi, M. Nakagiri, T. Watanabe, K. Kodaira,
K. Nishi, M. Iye, T. Onaka, and W. Tanaka

(昭和63年3月15日受理)

1. はじめに

UVSATは天体物理学を研究しているグループが将来日本の科学衛星の一つとして、計画している紫外天文衛星である¹⁾。現在天体物理学の学問的興味の一つの大きな課題は、太陽を含む恒星の外層大気の物理的状能の把握とその解明である。外層大気は光球と星間空間の間にある領域の総称で光球上層、彩層、遷移層、コロナ及び太陽風や星風と呼ばれる物質流など恒星周辺を含んだ部分のことである。重力収縮によって星間物質から生まれた恒星が、その進化の過程を通して母体となった星間空間との様な相互作用を繰り広げるかは天体现象としても非常に興味深い。その相互作用を支配する物理機構は電磁プラズマ中の非熱エネルギーの蓄積、伝播、散逸などの基礎過程に深くかかわっていると推定されており、その解明の意義は極めて大きい。一般に恒星大気は100K以下の星間空間から数100万Kにおよぶコロナを含むために、その解明には、電波からX線に至る幅広い輻射帯での観測を必要とする。特に恒星内部または表面近傍で生成された非熱エネルギーが熱エネルギーや粒子流のエネルギーに再配分される領域、即ち外層大気の基底部の物理状態の解明が鍵を握っており、10⁴Kから10⁶Kにわたる温度域に対応して真空紫外から極紫外を経て軟X線にわたる観測資料の入手が不可欠である。今回試作したグリズムの使用により、広い視野での天体の低分散スペクトルを撮像して、恒星は勿論のこと惑星状星雲な

どの掃天にあたり簡単なスペクトル分類やフラックスの分布の測定等が可能となる。

しかしこの輻射帶は地球大気の吸収のため地上には到達せず、ロケットや人工衛星など飛翔体を用いて地球大気圏外より観測しなければならない。我が国に於いては1960年代後半より宇宙科学研究所のロケットにより、太陽及び恒星の真空紫外での観測を行ってきた。最近では1982年S520-3号機によるオリオン領域の真空紫外分光測光、S520-5号機では太陽極紫外二次元像の観測に、また1987年S520-8号機では紫外二次元検出器による乙女座銀河団の紫外撮像観測に成功している。これらの実験の成功を契機として、UVSAT計画がその実現に向って進みつつある。

2. グリズムとは

グリズムは透過グレーティングとプリズムを組合せたもので、両者のコマ収差を打消す様にした分光素子のことである。従来分光観測にはグレーティング等を対物レンズや対物鏡と組合せているが、望遠鏡の大型化に伴いグレーティング等も大きいものが必要となつて来た。そこで大型望遠鏡の収束光中にグリズムを配置して使用し始めたのは近年のことである。グリズムを使用することにより複数の星のスペクトルを一度に観測できる点や機器の小型化と云う利点があり、特に飛翔体搭載用として、光軸調整、セッティングの安定性からも非常に有利である。

今回試作を行ったグリズムは真空紫外領域観測(1350~2000Å)での使用を目的とした

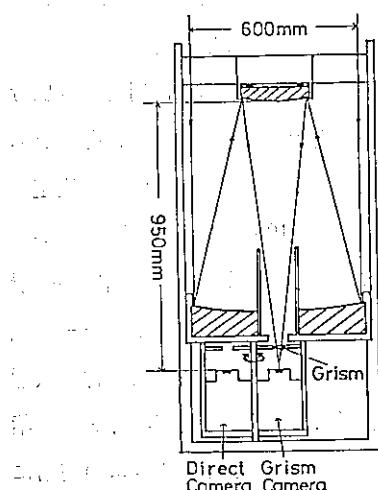


図1 グリズム・撮像系配置図

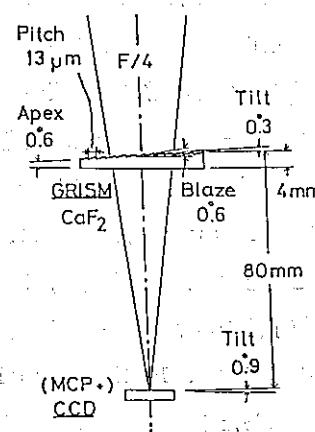


図2 グリズム設計例

UVSAT 搭載用紫外域グリズムの試作

ものである。UVSAT 搭載用分光器として考えている主鏡口径 60 cm, 合成F4, 焦点距離 240 cm 光学系内に配置する方式(図1)で設計を進めてきた。受光器として1画素 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 500×500 画素の固体素子を考えると空間分解能は $2.^{\circ}6$, 視野 $21.^{\circ}6$ となり、分光撮像による天体探索の観測を行なうことが出来る。

3. 設計及び製作

図2に製作したグリズムの設計諸元を示す。格子とプリズムを一体化し、プリズムの前面に格子を刻んだものの場合、その性質は格子の傾き (ω)、格子溝間隔 d (mm)、プリズム頂角 (A)、プリズムの厚み (mm)、材料の屈折率 n (λ)、そしてグリズムの焦点面との距離 l (mm) とで決り、コマ収差と球面収差を許容量以下に抑え、写野像面とスペクトル像面の傾きを一致させて望みの分散度を選ぶことが可能である。グリズムの大きさは $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 、厚さ 4 mm、格子間隔 $13 \mu\text{m}$ (約 76 l/mm)、ブレーズ角 0.6 度、プリズム頂角 0.6 度、材料としては CaF_2 を選定した。 CaF_2 を使用した理由としては、観測目的である $1350 \sim 2000 \text{ \AA}$ 近の透過率の良いこと、製造上の諸問題を考慮した。透過率だけを考えると LiF も良いが、潮解性や研磨の困難さ、また Geoコロナの $\text{Ly}-\alpha$ 光を避けるため使用出来なかった。

試作は島津製作所の装置を使用しイオンエッティング法で行なわれた²⁾。図3に簡単な製

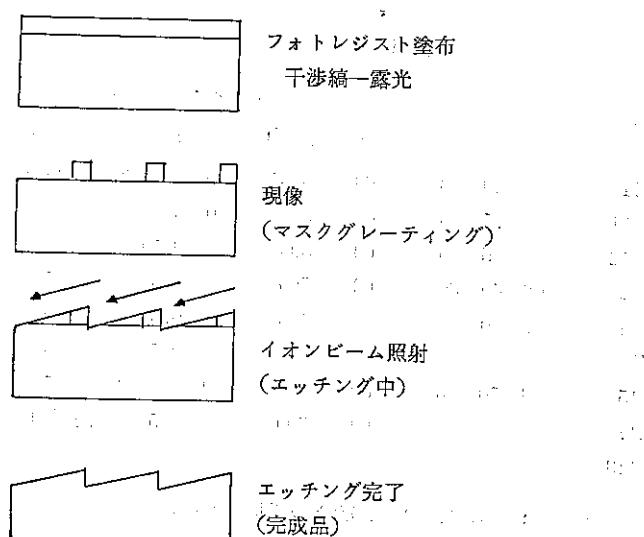


図3 イオンエッティング法による製作モデル

作工程を示す。まずプリズム頂角 0.6 度に研磨された CaF_2 を十分洗浄した後フォトレジスト（シップレー社、MP1300-17）を塗布する。次に He-Cd レーザーからの 441.6 nm 光による干渉縞を露光・現像し、 $13 \mu\text{m}$ 間隔の縦縞模様を作る。こうしてフォトレジスト層に作られたホログラフィックグレーティングはイオンエッチングを行う時のマスクグレーティングとして重要な役割をなす。イオンビームの照射によるグレーティングの溝加工には、大面積のビーム型イオンエッチング装置を使用した。この装置はイオン発生室と加工室とに別れていて、アクセラレーターグリッドで加速されたイオンビームは加工室内のステージに置かれた試料に照射される。ステージはイオンビームに対して、0~90 度まで任意の角度に調節でき、また試料はイオンの衝突による温度上昇を防ぐため水冷されている。

第 1 回目の試作グリズムは 1983 年 2 月に 9 枚が完成した。表 1 に各々の製作条件を示す。E と云うのは頂角 0.6 度のグリズムで、P は平面に溝を切ったもの；P7 はイオン照射だけのもの、そして P13 は CaF_2 のプランクである。

第 2 回目の試作は 1984 年 3~5 月、E-4 枚、P-1 枚。第 3 回目の試作は 1984 年 12 月、P-3 枚、つまり 1983 年~1984 年にわたり計 16 枚の試作品が作られ、それらについて透過率、分光効率及び表面形状等の測定を東京天文台で行った³⁾。

第 1 回の試作品はいかに CaF_2 面上面にブレーズ角を刻むかに重点をおき、製作上のパラ

表 1 グリズムの製作条件

No.	マスク*	イオン・エッチング				方 向**
		io	電 壓	電 流	照射時間	
E1	68 20 30	63°	500 V	0.48~0.31	30 min	+
E11	60 75 60	60	500	0.56~0.38	90	-
E12	60 5 60	60	500	0.59	90	-
E2	68 40 30	63	500	0.5	35	+
E4	60 10 60	60	500	0.5	90	-
E8	68 30 30	63	500	0.5	35	+
P5	68 50 30	80	500	0.46~0.34	35	-
P7	-	60	500	0.5	両面50	-
P13	-	-	-	-	-	-

* $n-m-l$; m: (溝の深さ)/(ピッチ間隔) の指數

l: 正弦波形状からのズレの指數

** +: 頂角の方向から -: 逆の方向からの照射を示す。

UVSAT 搭載用紫外域グリズムの試作

メータを各々変えて試みた。結果的には、 ± 1 次元の分光効率がほぼ等しく、いわゆるブレーズに対応する鋸歯的な形状ではなく、正弦波に近いものであった。これは触針による表面形状測定でも確認した。 CaF_2 上にブレーズ角 0.6 度と非常に浅く、溝間隔も $13 \mu\text{m}$ と通常使用されているグレーティングより幅広いものを刻む困難さに直面した。マスクグレーティングと CaF_2 のエッチングレートの違い、フォトトレジストの厚さ及び形状、またイオンビームの照射角度及び照射時間等が製作時の重要なポイントになり、これらが複雑な相乗効果を起す。特に CaF_2 の様な固い面上に 0.6 度と云うブレーズ角のため照射角度を大きくしなければならない。照射角度を大きくするために起るエッチングレートの低下は、製作に要する加工時間等困難を極めた。試作品の測定結果の検討及び種々テストの結果、1984年、第2回目試作品の製作パラメータは基本として次の様にした。

マスクグレーティング

フォトトレジスト：MP 1300-17 (シップレー社)

露光、現像： $60''$, $40''$ (22°C)

イオンエッチング

加速電圧： 600V , 0.4 mA/cm^2

照射時間：160 分

照射角度：80 度以上

製作されたグリズムの分光効率はかなり改善され、4枚のうち特に P35-2 は +1 次光へ回折される光量が 50% にも及び、ブレーズが格段に改良された。しかしブレーズ波長がかなり長波長側に寄り、ブレーズ角が深い事が解った。1984年11～12月の第3回目の試作はブレーズ角のみに着目し、フォトトレジストの形状、照射角度及び照射時間に関してのテストを重ねたが、長時間照射のためか透過率の低下をみた。これは装置全体の安定性や清浄性に新しい工夫が必要となった。

以上の様な経過をたどり 1985年1月第4回目の試作品の完成をみた。試作した E7, E8, P44 と云う3枚のグリズムについて透過率及分光効率の測定を行った。測定には真空紫外用モノクロロミーターを使用し、その光束中にグリズムを出入して測定した。図4は各グリズムの透過率を示す。長時間のイオンビーム照射にも拘らず E7 は、 1500\AA で 40%; 2000\AA で約 70% と最良の結果を得た。

図5, 6, 7 は各々 E7, E8, P44 の分光効率を示す。これは透過光に対する割合である。ここで E7 は $1550\text{~}1850\text{\AA}$ にわたり、+1 次光で 70% 以上の分光効率があり、0 次

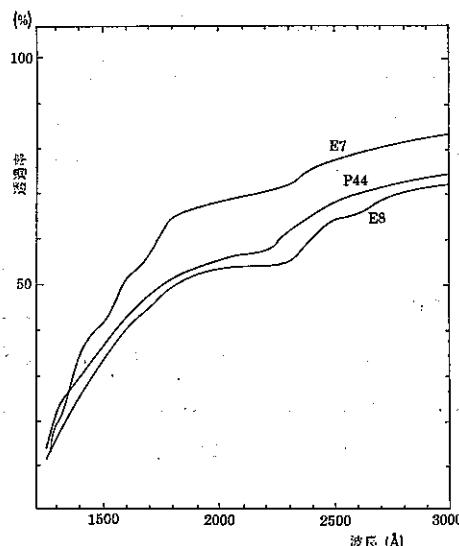


図 4 グリズムの透過率

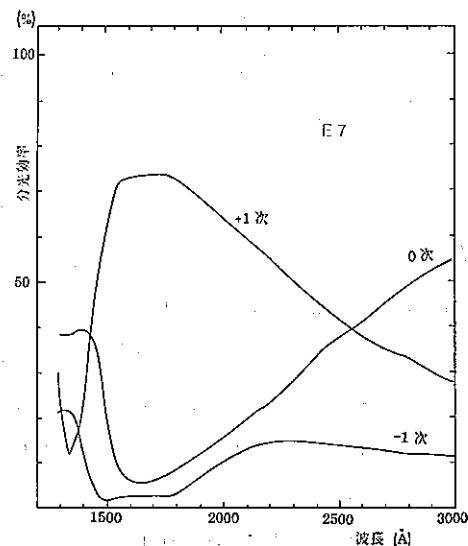


図 5 グリズム E7 の分光特性

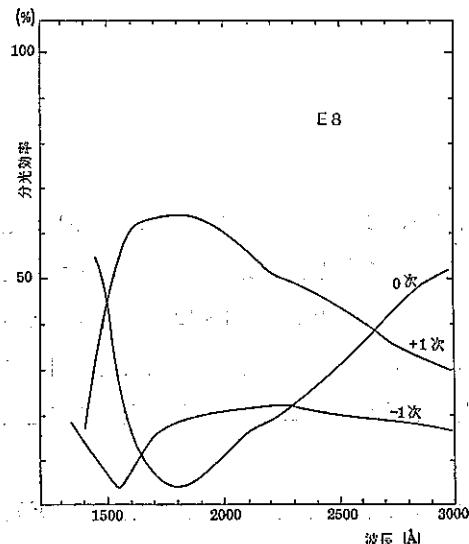


図 6 グリズム E8 の分光特性

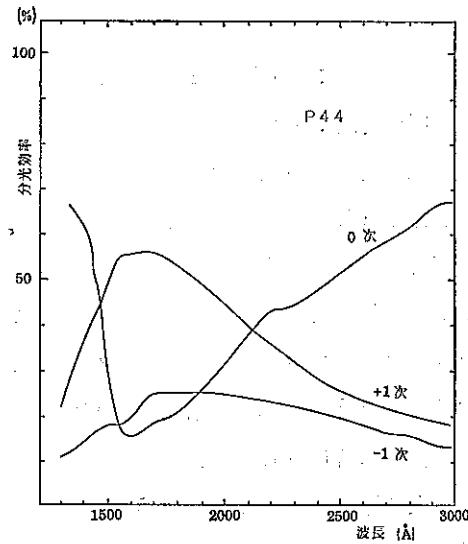


図 7 グリズム P44 の分光特性

及び -1 次光に対して圧倒的に強く良いブレーズ効果を示している。

図 8 はエッチングされたグリズム表面の触針による測定結果である。まだ完全な三角波状にはなっていないが、ブレーズが利いている様子が見られ透過率及び分光効率では一応の結果を得たものの形状である。製作技術としてはフォトレジストの形状、イオンビーム

UVSAT 搭載用紫外域グリズムの試作

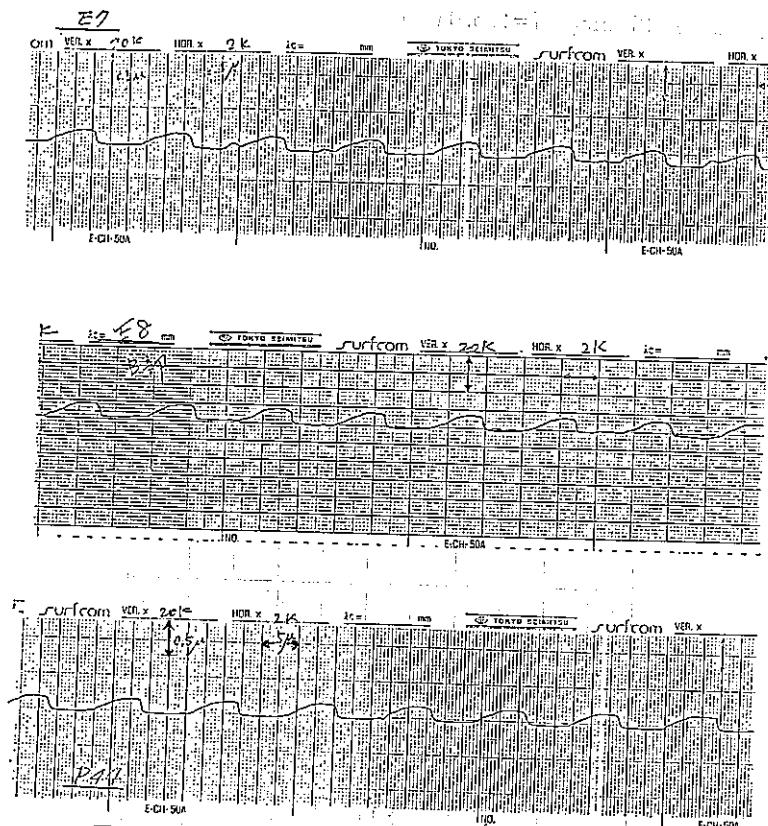


図 8 エッティングされたグリズム表面の触針による測定結果

照射角度等改善すべき点は残るが初期の目的をほぼ達成したと考えている。

4. UVSAT 搭載用 F4 光学系シュミレーターによる撮像実験

UVSAT 搭載用望遠鏡に対応する F4 の光学系にグリズムを配置し、実際の収束光中の性能評価のテストを試みた。この光学系は集光系、コリメータ部、カメラ部の三つから成り全体が 1200 mm の架台上にセットされている。光学系の仕様は次の通りである。

集光部：レンズ (MgF_2) 17 mm ϕ

$$f = 201.7 \text{ mm} \quad (1780 \text{ Å})$$

$$f = 235.8 \text{ mm} \quad (7065 \text{ Å})$$

コリメータ一部

主鏡（放物面）100 mm ϕ $f = 460.5 \text{ mm}$

副鏡（双曲面） $27 \text{ mm}\phi$ $f=225.0 \text{ mm}$

カメラ部

主鏡（放物面） $100 \text{ mm}\phi$ $f=180 \text{ mm}$

副鏡（双曲面） $52 \text{ mm}\phi$ $f=150 \text{ mm}$

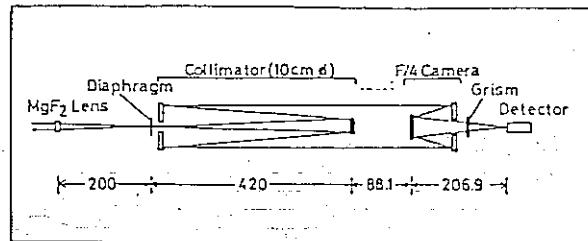


図 9 コリメータ及び $F/4$ カメラ光学系

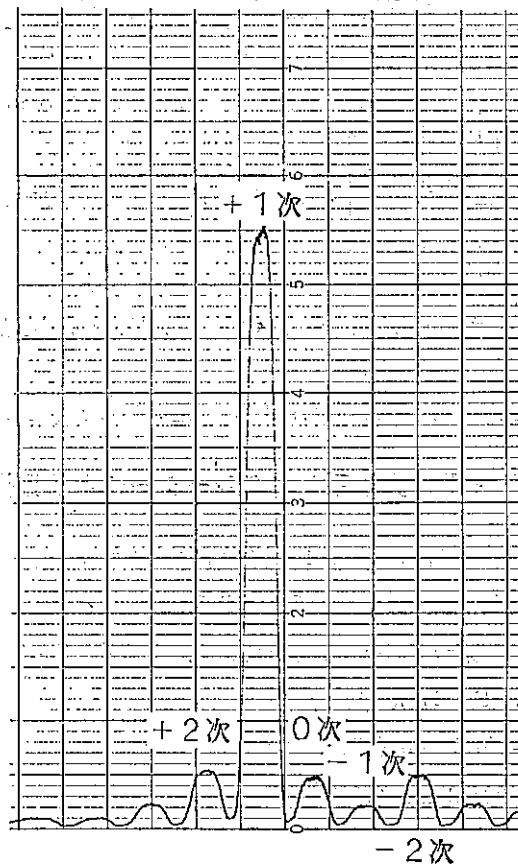


図 10 1608\AA での各次数による測定例

UVSAT 搭載用紫外域グリズムの試作

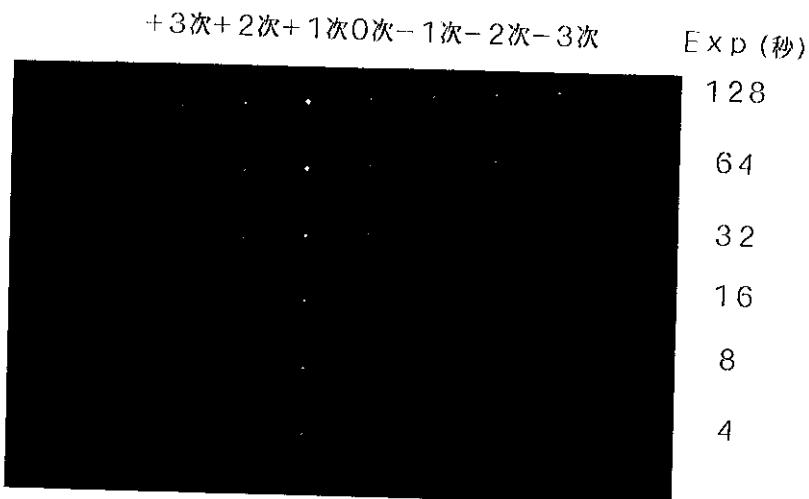


図 11 1608Å 単色光の撮像

グリズムはカメラ部の焦点より内側 80 mm の所に配置し、全体を真空槽内に収め光軸の調整を行う。図 10 は各次数における測定例を示す。これは焦点面にスリットを取付けた検出器を左右に移動しながら測定したもので、図 5 の分光効率測定と同じ結果を示している。

分散についてのテストは光量が少いため写真測定で行った。使用フィルムとしてコダック SWR を用いて現像は D-19 で 2 分、図 11 は 1608 Å の単色光で撮像したものの一例である。最も明るいのが +1 次像であって -2 次がやや強く写っているが实际上妨げとはならない。また各次数間の距離はフィルム上の測定で 0.94 mm、これは分散度の式

$$\frac{d\lambda}{ds} = \frac{1}{l} \left\{ \frac{m}{d} + A \frac{dn}{d\lambda} \right\}^{-1}$$

を満している。飽和に達していない像の大きさは、入口スリット 50–100 $\mu\text{m}\phi$ に対し 20–30 $\mu\text{m}\phi$ 程度であって、これも設計値を満している。更に多くの輝線を用いた撮像実験を行う予定であるが、初期の目的を達成したと考えられる。今後紫外域の低分散分光掃天等グリズムと検出器 (MCP, CCD) との組合せによる観測に期待できる。

最後にこのグリズムの試作にあたって、大阪大学基礎工学部の有留宏明氏、青柳克信氏に御指導いただき、また試作品の開発及び製作に御尽力下さいました島津製作所・佐野一雄氏に深く感謝致します。

山口朝三・他

参考文献

- 1) UVSAT ワーキンググループ：紫外天文衛星第一次計画案，宇宙科学研究所 SES-TD-82-003.
- 2) 佐野一雄・青柳克信・難波 進：応用物理，第48巻，第6号，p. 539 (1979).
- 3) 西 恵三・田中 済：昭和59年度研学研究費補助金，研究成果報告書，p. 152，名古屋大学工学部，研究代表者 吉原邦夫 (昭和60年3月).