

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340052

研究課題名(和文) 水素ライマン線による太陽彩層磁場観測のための分光装置用回折格子の開発

研究課題名(英文) Development of a concave grating for measurement of the solar-chromospheric magnetic fields in hydrogen Lyman alpha

研究代表者

原 弘久 (HARA, Hirohisa)

国立天文台・SOLAR-C準備室・准教授

研究者番号：20270457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円、(間接経費) 3,330,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水素のライマンアルファ線(Ly 線 121.6nm)の直線偏光を検出して太陽彩層・遷移層磁場を測定する観測ロケット実験計画CLASPに対して、観測装置に使用されるホログラフィック矩形溝の高効率凹面回折格子(溝本数3000本/mm、有効径 110mm)の国内開発を実施した。評価試験の結果、 $25 \pm 5\%$ という高い絶対回折効率をもち、ロケット実験における仕様を満たす凹面回折格子の開発に成功した。この研究では、回折格子の結像性能試験に使用するUV光源システムの開発も行った。

研究成果の概要(英文)：In this study we have developed a holographically-ruled spherical concave grating with a lamellar groove shape in collaboration with a domestic optics company for a sounding-rocket experiment CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter). The measurement of magnetic fields in the solar chromosphere and the transition region is the primary objective of the experiment by detecting the linear polarization through a spectro-polarimetric observation in the hydrogen Lyman alpha at 121.6 nm. The evaluation after the fabrication of the master grating of 3000 grooves/mm with an effective area within 110 mm in diameter shows that we have succeeded to develop a spherical concave grating with a high absolute grating efficiency of $25+/-5\%$, which satisfies the specification of the CLASP. We also developed a UV light-source system for evaluation of the grating performance in imaging spectroscopy.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽物理学 光学

1. 研究開始当初の背景

2006年にJAXA/ISASによって打上げられた「ひので」衛星は、その安定した高解像度により、彩層が予想以上に活動的であるという発見をした。彩層のダイナミクスの理解には「ひので」にはない分光的な観測から得られる物理量が欠かせない。その中で磁場の情報は最も重要なもので、彩層磁場の直接測定が強く求められてきている。

彩層磁場を定量的に評価するには偏光分光観測が必要である。地上からはHe I 10830Åの吸収線を使った彩層磁場の測定が多少なされているが、活動領域内などの限られた領域でしか観測できない難点がある。最近になって、活動領域外の彩層磁場測定に関して、水素のライマンα輝線(121.6nm)のハンレ効果を用いた彩層磁場測定手法が提案された(Trujillo Bueno, J. et al. 2005, ESA SP-596)。ハンレ効果は光の散乱過程で現れ、彩層磁場のように一般に100 Gauss以下と弱くゼーマン効果による波長分離をほとんど起こさない磁場強度に対しても、検出可能な直線偏光を生じる効果である。彩層磁場測定にライマンα輝線が有効であるのは、(1)複数の彩層由来の輝線のうち最も明るいこと、(2)輝線スペクトルの中心と周辺を使うことで、彩層の上部から下部までを広く観測できること、(3)ハンレ効果の理論的予測が最近改訂され、その直線偏光度が検出可能範囲に入ってきていることが判明したことによる。この輝線のハンレ効果を使った彩層磁場測定を世界で初めて実施する計画を日本の太陽研究グループが立て、他国の研究グループを巻き込んで開始しようとしている。

2. 研究の目的

「ひので」において米国側の中心的パートナーであったNASAマーシャル宇宙飛行センター(MSFC)の研究者との国際協力に基づき、平成27年度の夏にNASAの科学観測用ロケットを使用した太陽観測を実施することを計画している。そこでは、世界で初めて水素のライマンα輝線のハンレ効果による彩層磁場の直接測定を目指している。この実現のため、彩層観測用ライマンアルファ輝線偏光分光装置CLASP(Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter)を開発中であるが、今回の研究ではその分光装置の主要光学要素となる凹面回折格子の開発に焦点を当てる。

遠紫外線・極端紫外線領域では、反射率などの光学系効率を高くすることが困難であるため、凹面に刻線溝を形成して分光と結像を同時に行う光学素子、凹面回折格子が使用される。凹面の曲面としては、最も簡単な球面のほか、収差補正のためトロイダル面などの非球面が一般的に使用される。天文学で使用する凹面回折格子は、時々刻々変化する天

体現象を高い時間分解能で高感度に分光観測するには欠かせないものであるが、高い波長分解能、刻線の非一様性から発生するゴーストレベルが低いこと、また遠紫外線・極端紫外線では散乱光レベルが低いことなどの高い性能が要求される最も高額な光学要素の一つである。

CLASPの偏光分光装置では、凹面回折格子を±1次で使用する分光素子とコリメータ鏡としての役割をもたせている。CLASPの設計では、球面形状、矩形溝、溝本数3000本/mm、有効径φ110mmの大型の凹面回折格子が必要とされる。ゴーストや散乱光レベルが小さいことや、目的の溝形状を形成するには、機械切りによる刻線・ホログラフィック刻線と2種類ある刻線方式のうち、ホログラフィック刻線による刻線方式を選択する必要がある。また、球面に目的の溝を形成した後は、ライマンアルファ線波長で高い反射率をもつコーティングを塗布することが必要である。事前調査の結果、国内ではこのような凹面回折格子の製作実績のある光学会社は存在せず、確実に開発を進めるために当初はフランスの光学会社と開発を進める予定であった。また、開発された凹面回折格子の偏光性能の評価装置を同時に製作する予定であった。

当初計画に対して、申請書の採択が遅れたことと、採択金額が申請額の半分程度に減額されたことから、フランスの光学会社とともに凹面回折格子を開発する解はなくなった。このため、想定する観測装置に必要なとされるホログラフィック刻線の凹面回折格子を国内光学メーカーとともに開発することにチャレンジすることとし、また、評価装置については主要な要素開発を実施することとしている。

3. 研究の方法

凹面回折格子の製作を依頼することになった国内光学メーカーはシンクロトロン光施設等に使用される凹面回折格子を開発した実績をもつが、φ60mmをこえる広い領域にわたって刻線密度(>2000本/mm)をもち、遠紫外線領域で使用される宇宙望遠鏡用のものは開発実績がない。

この開発研究を始める前年度までに、CLASP開発チームの別の構成員が溝本数2400本/mmのホログラフィック凹面回折格子を同じ国内光学メーカーに依頼して試作し、効率測定までを実施している。ホログラフィック回折格子についてはグループとしては全く初めての試作開発であり、このとき二つの課題が浮かび上がった。一つは、比較的広い有効領域面の中で溝形成の不良領域が数多く見られたことと、もう一つは溝の形成状態が

よいところでも高い回折効率を得られなかった点である。前者は光学メーカーの経験から、ホログラフィック刻線前に回折格子基板に塗布するフォトレジスト厚のむらに起因するものであり、後者は溝形成後に増反射のためにつける MgF₂ コーティングの性能の問題と理解された。これらの対策をとりながらも、試作を繰り返すことができるだけの予算は与えられていないので、最低限の製作回数と、製作に必要とされる製作部材数の低減を考慮して開発方針を以下のように立てた。

フォトレジスト厚の面内むらが大きかった原因は、比較的広い面積領域にわたって一様にレジストを塗布するということができていなかったためであり、フォトレジストの一樣塗布のための条件出しの手続きをメーカー側にとってもらったこととした。また、CLASP の回折格子の溝本数が 3000 本/mm と増加したことともなっており、国内光学メーカーのもつ装置では有効径最外領域まで溝形成ができるかが自明でない状況となった。これらの 2 点について試作を通して確認するため、120mm 角の平面基板に矩形溝形状で溝本数が 3000 本/mm となる溝をもつ平面回折格子をまず製作することとした。また MgF₂ コーティングについても高い反射性能をもつ条件を探するため、光学メーカーに条件の異なるサンプルを大量に製作してもらい、国立天文台内の遠紫外線モノクロメータでの測定を通してフィードバックをかけながら高反射率コーティングの成膜条件を得ることとした。これらの二つの確認を経てから凹面回折格子の製作へと進めば、高効率回折格子の製作ができると考えた。

上記のように、回折格子は確認用の平面回折格子と開発品としての凹面回折格子を製作することとした。高性能の回折格子製作は state-of-the-art の領域にあるため、凹面回折格子は 3 つと複数個製作することとした。基板の経費も無視できないため、基板数を少なくするために、製作するホログラフィック平面・凹面回折格子は全てマスター回折格子である。国内光学メーカーには、共同開発ということで経費的にも協力してもらっている。

製作する凹面回折格子の性能評価はいくつかに分けて実施する。曲面形状・曲率半径は合成石英ガラス基板の準備時に干渉計測定で確認する。回折格子の絶対回折率は回折格子面にわたってシンクロトン光施設で測定する。シンクロトン光のビーム径は 2mm 程度であるため、CLASP 偏光分光装置の使用時のように面内全体を同時に照らして、分光・結像性能を確認することはできない。これについては、必要な UV 光源システムの主要部の開発をこの研究費を用いて行い、CLASP 分光装置へ組み込んで評価データを取

得する予定としている。ただ、これは CLASP 分光装置の組み立てが終了する段階でのことであり、2 年半の開発研究期間が終了してから約半年後に実施する内容となる。

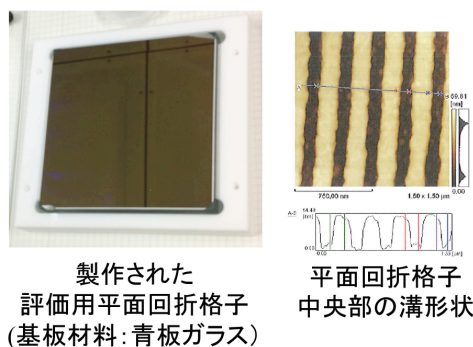
4. 研究成果

初年度の半年間は回折格子の開発準備期間にあて、開発品の設計確認・仕様(表 1)、開発方針を国内光学メーカーと打ち合わせ、また評価測定のための準備を行った。

表 1 凹面回折格子の仕様

Grating Parameters		
	CLASP用凹面回折格子	今回の国内開発品
マスター/レプリカ	レプリカ	マスター
基板材料・形状	ゼロデュア・球面	合成石英・球面
外径寸法	115 mm × 115 mm	115 mm × 115 mm
中心厚	25 mm	20 mm
曲率半径	1749.3±2 mm	1749.3±0.5 mm
有効領域	φ110mm	φ90 mm (110まで刻線)
溝形状	ホログラフィック刻線 等間隔直線溝フミナー	ホログラフィック刻線 等間隔直線溝フミナー
溝本数	3000±0.5本/mm	3000±3本(目標±1)/mm
使用波長	121.6 nm	121.6 nm
コーティング	Al+MgF ₂	Al+MgF ₂
m=±1の効率	> 18%	-

2 年目には、まず平面回折格子の製作と MgF₂ コーティング開発を進めた。製作された平面回折格子が図 1-(左)、その中央部での刻線溝の断面形状が図 1-(右)である。回折格子溝は φ110mm まで形成されていることを確認している。また、試作された多数のコーティングサンプルを国立天文台の遠紫外線測定装置(図 2-(上))で測定し、そのうち代表的なものを図 2-(下)に示した。サンプル製作の時系列順にサンプル A から E というように名称をつけているが、測定結果を通してフィードバックをかけるごとにライマンアルファ線での反射率が増加していることが分かる。平面回折格子には図 2 (下) のサンプル C レベルのコーティングを、また、凹面回折格子にはサンプル E に改良を加えたものを採用している。



製作された
評価用平面回折格子
(基板材料:青板ガラス)

平面回折格子
中央部の溝形状

図 1(左)開発した平面回折格子と(右)溝形状

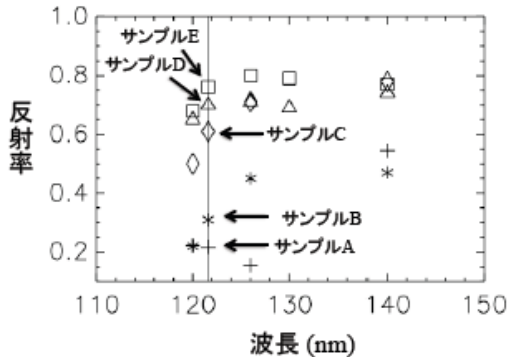
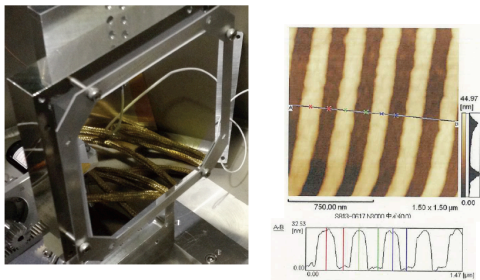


図 2(上)測定装置と(下)試作 MgF₂ 鏡の反射率

評価用の平面回折格子の開発を経て、2 年目の後半から凹面回折格子の開発へと進んでいる。3つのマスター凹面回折格子を製作したが、そのうち最も性能のよいものを最終開発品と位置づけている。製作された凹面回折格子の一つと、その中央部の溝形状を図 3 に示す。溝形状は評価用の平面回折格子より良好で、溝深さも理想的なものが得られた。

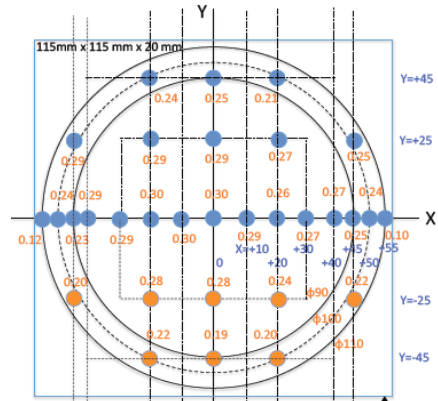


製作された凹面回折格子No.1 凹面回折格子中央部の溝形状 (基板材料:合成石英)

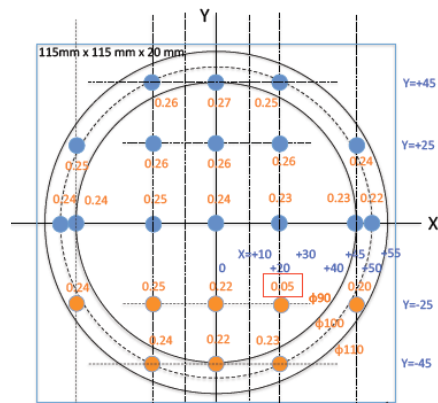
図 3 (左)開発した凹面回折格子と(右)溝形状

今回の研究で開発した凹面回折格子は、3 年目の夏期に全て分子科学研究所のシンクロトロン光施設で測定している。製作を行った国内光学メーカーが最終開発品(No. 1)として位置づけたものの一次光(回折次数 $m=-1$)の絶対回折効率を図 4 (上)に、もう一つのもの(No. 3)を図 4(下)に示す。ともに全面で高い絶対効率をもつものとなっており、CLASP ロケット観測の仕様を満たすものが国内で開発可能であることを示すことができている。No. 1 では最外周部で効率が低くなっているように見えるが、これはビーム径が 2mm 程度あることと、 $\phi 110\text{mm}$ 外部には溝が形成されていないことによる。No. 3 では 1cm 角程度の領域で低効率である領域があり、

その後の溝形状調査から、そこでは局所的に溝形成不良が発生していることが判明している。これはホログラム露光前のフォトレジスト膜塗布厚に問題があったと理解されており、露光前にフォトレジスト膜厚の検査が可能になれば、良質な回折格子を安定して製作ができるようになると考えている。



赤字は-1次光($m=-1$)の回折効率(ダーク補正済み)(0,0) or 裏面法線に対する入射角 2° (直入射は 0°) 基準面
下面半分の点(オレンジ色の点)は回折格子を180°回転して測定



赤字は-1次光($m=-1$)の回折効率(ダーク補正済み)(0,0) or 裏面法線に対する入射角 2° (直入射は 0°) 基準面
下面半分の点(オレンジ色の点)は回折格子を180°回転して測定!

図 4 凹面回折効率絶対効率 (上: 最終開発品 No. 1、下: No. 3)。

今回開発した凹面回折格子の曲面形状は球面であり、製品がマスター回折格子であることから溝形成前の曲面形状は基板形状を維持しているため、分光結像性能は設計通りのものが得られると期待している。開発期間の終了後には、CLASP 分光装置に今回開発した凹面回折格子を取り付けて、装置のもつ検出器面上で回折格子の分光結像性能の確認を予定している。また、その際に使用する光源システムは 100%直線偏光したライマンアルファ線を作り出すが、その主要部分の開発を今回の研究費の一部で進めた。その中で、ライマンアルファ線波長の半波長板の開発を行い、その開発結果を査読付き論文として出版することができている。

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 Ishikawa, R., Kano, R., Bando, T., Suematsu, Y., Ishikawa, S., Kubo, M., Narukage, N., Hara, H., Tsuneta, S., Watanabe, H., Ichimoto, K., Aoki, K., and Miyagawa, K., 'Birefringence of magnesium fluoride in the vacuum ultraviolet and application to a half-waveplate,' Appl. Opt., 52, 8205-8211 (2013)
DOI:10.1364/AO.52.008205 (査読有)

[学会発表] (計6件)

- ① 原 弘久, 成影典之, 木挽俊彦, 春日恵美, 宮川健太, 青木邦哉, 笹井裕行, 武山芸英, 「太陽彩層・遷移層磁場観測を目指した遠紫外線域凹面回折格子の開発 II」, 日本天文学会、2014年3月20日、国際基督教大学(東京都)
- ② 久保雅仁, 末松芳法, 鹿野良平, 坂東貴政, 原 弘久, 勝川行雄, 成影典之, 常田佐久, 春日恵美, 青木邦哉, K. Kobayashi, 「太陽Ly α 線偏分光観測ロケット実験 CLASP の Slit-jaw 光学系試作品の評価」, 日本天文学会、2014年3月20日、国際基督教大学(東京都)
- ③ 石川遼子, 鹿野良平, 坂東貴政, 末松芳法, 石川真之介, 久保雅仁, 成影典之, 原 弘久, 常田佐久, 渡邊皓子, 一本 潔, 青木邦哉, 宮川健太, 「真空紫外線に特化した高精度 MgF₂ 波長板の開発」, 日本天文学会、2014年3月20日、国際基督教大学(東京都)
- ④ 鹿野良平, 坂東貴政, 成影典之, 石川遼子, 久保雅仁, 勝川行雄, 石川真之介, 加藤成晃, Giono Gabriel, 原 弘久, 末松芳法, 清水敏文, 坂尾太郎, 宮川健太, 後藤基志, K. Kobayashi, J. Trujillo Bueno, and F. Auchere, 「Ly α 線偏分光観測ロケット実験 CLASP の進捗状況とその観測計画」, 日本天文学会、2014年3月20日、国際基督教大学(東京都)
- ⑤ 原 弘久, 石川遼子, 青木邦哉, 成影典之, 笹井浩行, 「太陽彩層・遷移層磁場観測を目指した遠紫外線域凹面回折格子の開発 I」, 日本天文学会、2013年3月21日、埼玉大学(埼玉県)

- ⑥ 久保雅稔, 鹿野良平, 坂東貴政, 木挽俊彦, 石川遼子, 久保雅仁, 勝川行雄, 原 弘久, 常田佐久, 成影典之, K. Kobayashi, D. Song, 「太陽彩層 Ly α 線偏分光観測装置 CLASP で用いる凹面回折格子の波長分解能評価法の構築」, 日本天文学会、2012年3月20日、龍谷大学(京都府)

[その他]

ホームページ等

http://hinode.nao.ac.jp/user/haraha/kakenhi_2011_2013.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 弘久 (HARA, Hirohisa)
国立天文台・SOLAR-C 準備室・准教授
研究者番号: 20270457

(2) 研究分担者 該当者なし

(3) 連携研究者

鹿野良平 (KANO, Ryohei)
国立天文台・SOLAR-C 準備室・助教
研究者番号: 70321586

成影典之 (NARUKAGE, Noriyuki)
国立天文台・先端技術センター・特任研究員
研究者番号: 50435806