

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740134

研究課題名(和文)ライマン線を用いた太陽大気磁場測定のための多層膜高反射率偏光ミラーの開発

研究課題名(英文)Development of the multi-layer high-reflectivity polarizing mirror for the magnetic field measurement of the solar atmosphere in Lyman-alpha line

研究代表者

成影 典之(NARUKAGE, Noriyuki)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50435806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：太陽大気磁場を測定するための、ライマン線用・偏光解析装置に用いる高反射率偏光ミラーの開発を行った。具体的には、熔融石英の基板にMgF<sub>2</sub>とSiO<sub>2</sub>の薄膜を蒸着するタイプの偏光ミラーを試作し、評価を行った。評価の結果、s偏光の反射率R<sub>s</sub>は54.8%、p偏光の反射率R<sub>p</sub>は0.29%であった。この時、偏光解析能力を示す指標 polarizing power  $P = (R_s - R_p) / (R_s + R_p)$  は0.99で、ほぼs偏光のみが取り出せる。そしてs偏光の反射率は、従来型のMgF<sub>2</sub>偏光板(R<sub>s</sub> = 22%)の約2.5倍であった。以上より、高い偏光解析能力と高い効率を持つ偏光ミラーが完成した。

研究成果の概要(英文)：I developed the multi-layer high-reflectivity polarizing mirror for the magnetic field measurement of the solar atmosphere in Lyman-alpha line (121.6 nm). This mirror consists of MgF<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> layers on a Fused Silica substrate. I fabricated the test pieces of this type mirror, and measured their performance at the Synchrotron facility. The measured reflectivities for s- and p- polarized lights in Lyman-alpha line are R<sub>s</sub> = 54.8% and R<sub>p</sub> = 0.29%, respectively. Hence, the polarizing power  $P = (R_s - R_p) / (R_s + R_p)$  is 0.99. This means that this mirror reflect almost only s-polarized light. The R<sub>s</sub> of this mirror is about 2.5 times larger than the MgF<sub>2</sub> plate that is commonly used and whose R<sub>s</sub> is 22%. On the basis of these results, it is concluded that the high-reflectivity polarizing mirror has been successfully developed.

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：偏光測定 ライマン線 真空紫外線 多層膜コーティング 太陽 彩層磁場

1. 研究開始当初の背景

彩層・遷移層・コロナといった太陽大気は、太陽表面（光球）よりも高温であるにも関わらず安定して存在している。これは太陽大気が定常的に加熱されていることを意味するが、そのメカニズムは未だ不明である。

日本の太陽観測衛星「ひので」の詳細な観測により、彩層はダイナミックな運動で満たされていることが解かった。しかし「ひので」を含む彩層観測の大半は撮像のみで、エネルギーの輸送や解放に重要な役割を果たしているはずの磁場の測定は、ほとんど行われていない。なぜなら、太陽大気の磁場は弱く、ゼーマン効果によって生じる偏光信号が小さい上に、その僅かな信号も激しい熱的・非熱的運動によるドップラーシフトによって掻き消されてしまうためである。

この様な中、ハンレ（Hanle）効果を用いた太陽大気磁場測定に注目が集まっている。ハンレ効果による偏光は、①彩層での非等方放射場で生じる原子の量子論的遷移の不均一性（atomic polarization）の発生、②放射場軸に対して傾いた磁場による量子状態の混合（atomic coherence）、③磁場による混合量子状態の破壊（Hanle effect）、④これらの過程によって決まる原子の量子状態を反映した直線偏光スペクトルの形成、という複数の過程によって生じる。この様な過程で生じるハンレ効果は、熱的・非熱的運動の影響を受けにくく、太陽大気磁場の測定に利用できる。近年、このハンレ効果の量子力学的過程の理解が急速に進み、観測した直線偏光から磁場強度を求めることが可能となりつつある（図1参照）。

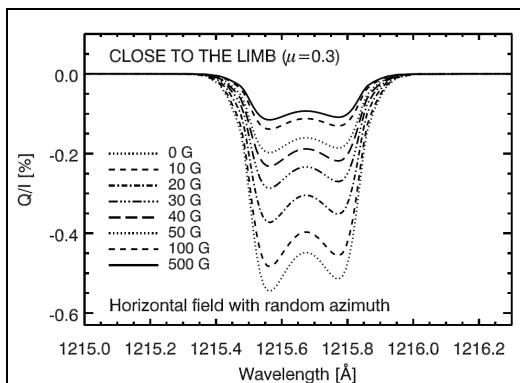


図1. ライマンα線で太陽の縁付近を観測した場合に、ハンレ効果理論から予測される直線偏光信号の割合。各線は磁場強度の違いを示している。(Trujillo Bueno, Štěpán and Casini, *Astrophys. J. Letters*, **738**, 1, L11, 2011)

例えば、地上観測ではハンレ効果に感度のある赤外線波長のヘリウムの吸収線を用い、彩層上部の磁場測定が試みられている。しかし、この吸収線の形成にはコロナからの十分な光の供給が必要なため、観測できる場所は

活動領域の周辺など、太陽のごく一部の領域に限られる。

一方、真空紫外線波長域には彩層～遷移層のプラズマから放射されるスペクトル線が多数存在する。その中には活動領域だけでなく太陽面上の大半を占める静穏領域も含めた、様々な太陽大気構造の磁場測定が可能なラインがある。例えば、ライマンα線（波長1216Å）は彩層上部～遷移層で生じる最も明るい輝線である上、ハンレ効果の磁場感度が適度で、静穏領域の弱い彩層磁場（数ガウス）でも検出できる可能性が高い。また、検出の上限は100ガウスを超えており、活動領域上空の磁場測定にも用いることができる（図1参照）。

ところが、大気によって吸収される真空紫外線は宇宙からの観測が不可欠であるため、これまで撮像の観測例自体が少なく、偏光については測定されていない。また、そのために必要な技術開発も進んでいない。特に、ハンレ効果の検出には偏光分光観測において0.1%の測光精度が必要である（図1参照）。そのためには、十分な光子数を集めて光子雑音を抑えるとともに、装置の誤差要因も十分小さく抑える必要があるが、真空紫外線でこのような高精度の偏光分光測定が可能な装置はまだ開発されていない。

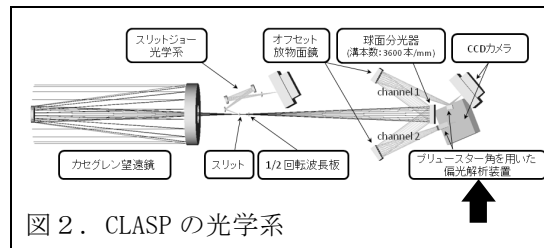


図2. CLASPの光学系

そこで、研究代表者を含む日本の太陽グループは、世界に先駆けてハンレ効果を用いて彩層～遷移層～コロナの磁場を直接計測する技術・理論の確立を目指し、ロケットを用いた実証実験「Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter (CLASP)」を計画している。CLASPは、日米を中心とした国際ミッションで、研究代表者は instrument scientist (装置開発の責任者) を務めている。図2は、研究代表者が設計したCLASPの光学系である。CLASPには0.1%の測光精度が要求されているため、いかに多くの光量を集めるかが実験の成否を決めるカギとなる。ライマンα線は大気にさえも吸収されてしまう位で、光学素子に使える物質は限られている上、その様な物質でさえも透過率は低い。そこで、光学系は出来る限り反射型にし、光を失わない工夫をしている。しかしそれでも、ロケットのフライト時間・約5分間で光子400万個（光子雑音率0.05%）を集めるためには、分解能を1.4秒角（スリット幅）×6.4秒角にまで落とす必要がある。これは観測対象である静穏領域の

構造の大きさ（約 10 秒角）とほぼ同じで、科学要求をぎりぎり満たす分解能である。

## 2. 研究の目的

CLASP の偏光アナライザー（偏光板）は、ライマン α 線用の素材として古くから知られているフッ化マグネシウム ( $\text{MgF}_2$ ) の結晶板をブリュースター角に配置したものを採用していた。その偏光解析能力については 2009 年にシンクロトン放射光を用いて評価済みで、偏光解析能力を示す指標 polarizing power  $P = (R_s - R_p) / (R_s + R_p)$  は 0.95 と 1 に近く、ほぼ s 偏光の光のみが取り出せる偏光アナライザーとなっている（ここで、 $R_s$  は s 偏光の反射率、 $R_p$  は p 偏光の反射率）。ただ、この偏光アナライザーで取り出せる s 偏光の反射率  $R_s$  は約 22% しかない。この様な状況の中、 $P$  を 1 近くに保ったまま、高い  $R_s$  を持つ、高反射率偏光ミラー用の多層膜コーティングが研究されていることを知った (Bridou et al., Applied Physics A, 102, 3, 641-649, 2011)。Bridou et al. (2011) では 4 種類のコーティングを提案しているが、我々はその中で「熔融石英の基板の上に  $\text{MgF}_2$  と  $\text{SiO}_2$  の薄膜を蒸着するコーティング; モデル計算による  $R_s$  の見積値 = 58.4%」に目を付けた。理由は、これらの物質は化学的に安定している上、真空紫外域の光学素材として汎用的に使われており、製造の実現性ももっとも高いからである。しかし、Bridou et al. が行ったコーティングの試作と評価では、s 偏光の反射率においてモデル計算と測定値の間に約 20% の乖離があり、薄膜コーティングの困難さがうかがい知れる。

そこで本研究では、宇宙ミッション用の多層膜コーティングで実績があり、可視光除去用コールドミラーコーティングで CLASP との共同開発実績もある Acton Optics & Coatings 社（以下、アクトン社）と共同し、このコーティングの開発と実用化を目指した。

## 3. 研究の方法

本研究は、「試作評価用基板へのコーティング→試作品の評価→実用品へのコーティング→実用品の評価」という手順を進めた。コーティングは、アクトン社のプラネタリー・システムを有するコーティングチェンバーを用いて行った。コーティング時には、評価用のウイトネス・サンプル基板（直径 30mm）もチェンバーに入れ、同時にコーティングを施した。

評価実験は、自然科学研究機構・分子科学研究所・極端紫外光研究施設（以下、UVSOR）のビームライン BL-7B（図 3）のシンクロトン放射光を用いて行った。UVSOR の BL-7B は、「強い強度」・「高い安定性」・「高い直線偏光性」・「高い単色性」を持つ光源である。

このビームラインに真空チェンバーを接続し、チェンバー内に反射率測定用機器を配置した。測定用機器は、100%直線偏光したライマン α 光を作り出すための「完全直線偏光クリナー（精製装置）」と測定用の「ゴニオメーター（ $\theta$ -2 $\theta$  台）」から成る。（図 4）



図 3. UVSOR BL-7B

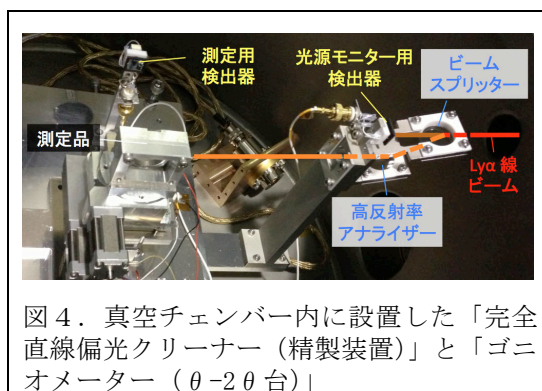


図 4. 真空チェンバー内に設置した「完全直線偏光クリナー（精製装置）」と「ゴニオメーター（ $\theta$ -2 $\theta$  台）」

シンクロトン光と完全直線偏光クリナーの組み合わせにより、「強い強度」・「高い安定性」・「100%の直線偏光」・「高い単色性」を持つ理想的な光源を作り出し、この光を用いて以下の評価を行った。

- ① polarizing power  $P = (R_s - R_p) / (R_s + R_p)$  の最大値とその時の入射角度  $\theta_B$ 。
- ②  $\theta_B$  近傍での  $P$  の角度依存性。
- ③  $\theta_B$  近傍での  $R_s$  の値。
- ④ 項目①～③のアナライザー面内での一様性。

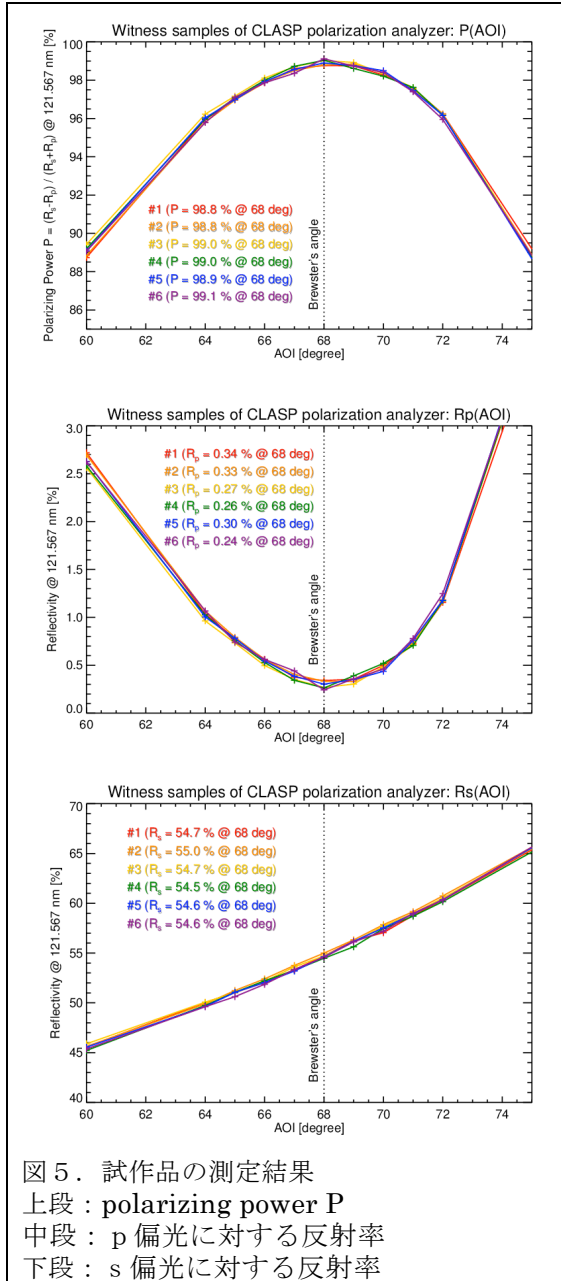
項目①はアナライザーの偏光解析能力の評価で、項目②はその能力がどの程度入射角に依存するかの評価、項目③は本研究が目指す高反射率の評価、項目④は性能の一様性を評価する項目である。項目①②については、CLASP での使用を考えている  $\text{MgF}_2$  の結晶板と同程度 ( $P = 95\%$ ) の性能を合否判定の閾値とし、項目③については  $\text{MgF}_2$  の 2 倍以上の反射率 (44%以上) を閾値とする。

## 4. 研究成果

試作は、3 枚の試作基板 (72 mm×33 mm) と 6 枚のウイトネス・サンプル基板 (直径 30mm) に対して行った。試作基板は CLASP の

偏光アナライザーと同じサイズとし、ウィットネス・サンプルは評価試験用である。

評価結果は、図5にまとめた。評価項目①、②の polarizing power  $P$  は、入射角度  $68^\circ$  で最大値 99%、 $68^\circ \pm 3^\circ$  の範囲で  $P > 97\%$  となり、 $MgF_2$  よりも高い性能 ( $P$ ) を有していた。評価項目③の  $R_s$  は入射角度  $68^\circ$  で 55% と、 $MgF_2$  の 2.5 倍の反射率を持っていた。また、Bridou et al. (2011) のモデル計算値 58.4%にも近い値であった。評価項目④の一樣性は、図5の様に、6枚のサンプルで極めて優れていた。

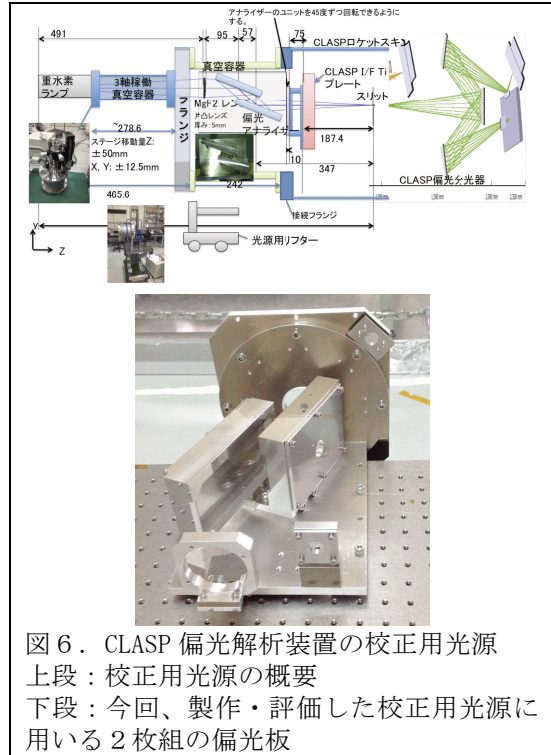


以上のように、評価4項目すべてにおいて優れた性能を持つ高反射率アナライザーの試作を完了した。

本試作品は、上述のように期待通りの性能を持っていることが確認され、従来の  $MgF_2$  製アナライザーと置き換えるだけで CLASP の

効率を 2.5 倍も高めることが出来ることから、チーム内の了承プロセスを経て、正式に CLASP の偏光アナライザーとして採用された。

試作の良好な結果を踏まえ、次に試作品の約 2 倍の大きさを持つ基板 ( $150\text{ mm} \times 76\text{ mm}$ ) へのコーティングを行った。このサイズの基板は、「CLASP 偏光解析装置の校正用光源」(図6)に必要なサイズである。



この校正用光源には以下の性能が求められる。

- A. 既知の直線偏光度を持つ光を出すこと。
- B. 強度が強いこと。
- C. 偏光装置の光学面全体に光を照射させること。

A. については、偏光板を用い 100%に近い直線偏光を作り出せばよく、B. については偏光板の反射率が高いことが望ましい。つまり、今回開発した高効率偏光ミラーが役立つ。ただし、C. を満たすためには、偏光板のサイズを試作品の 2 倍 ( $150\text{ mm} \times 76\text{ mm}$ ) にする必要があり、この範囲全体での polarizing power ( $P$ ) を 1 に近くする必要がある。つまり、この範囲での反射率の一樣性の確保が必要となる。校正用光源に用いる偏光板の合否判定の閾値は、偏光校正のエラーバジェット検討から  $P > 98\%$  とする。

評価は、試作時と同様、UVSOR BL-7B を用いて行った。今回の評価項目は、試作時よりも広い範囲 ( $150\text{ mm} \times 76\text{ mm}$ ) での反射率の一樣性で、図6の様に平行に配置した 2 枚の偏光板の反射率をスキャンした。図7が評価結果である。2 枚の偏光板で 2 回反射した場合であるが、 $150\text{ mm} \times 76\text{ mm}$  の範囲における反射率ムラは  $\pm 3\%$  以内であった。この反射率

ムラを基に、偏光板全体の polarizing power (P)を見積もると、全体として  $P > 98.5\%$  となり、光源用の偏光板として必要な閾値を満たした。

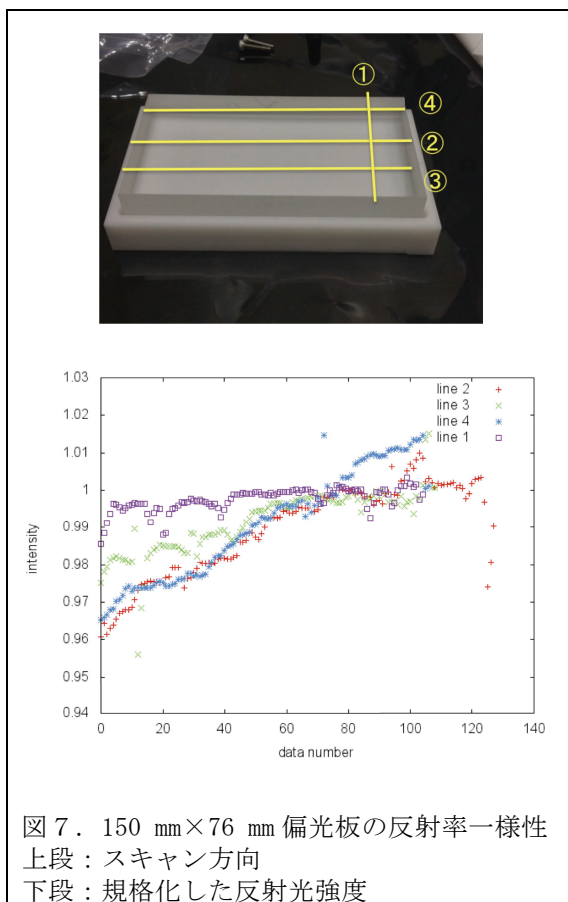


図7. 150 mm×76 mm 偏光板の反射率一様性  
上段：スキャン方向  
下段：規格化した反射光強度

このサイズの偏光板が製作出来たことで、活用の範囲は広がり、本研究の目的である多層膜高反射率偏光ミラーの開発は成功裏に完了した。

## 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 0件)

[学会発表] (計 4件)

### ① Noriyuki Narukage et al.

“UV spectropolarimeter design for precise polarization measurement and its application to the CLASP for exploration of magnetic fields in solar atmosphere”

40th COSPAR Scientific Assembly 2014  
年08月02日～2014年08月10日 Moscow, Russia 【発表確定】

### ② Noriyuki Narukage et al.

“High-throughput telescope and spectropolarimeter for the CLASP sounding rocket project”

SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray 2014年06月23日 Montreal, Quebec Canada

### ③ 成影 典之, 石川 真之介, 木挽 俊彦, 鹿野 良平, 坂東 貴政, ほか CLASP チーム

「太陽Ly $\alpha$ 線偏光分光観測ロケット実験 CLASP の高効率反射型偏光解析素子の開発」

日本天文学会 2013 年秋季年会 2013 年09月10日～2013年09月12日 東北大学 (宮城県仙台市)

### ④ 成影典之、CLASP チーム

「太陽 Ly $\alpha$  線偏光観測ロケット実験 CLASP が挑む遷移層～彩層磁場測定」

日本天文学会 2012 年秋季年会 2012 年09月19日 大分大学

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://hinode.nao.ac.jp/CLASP/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

成影 典之 (NARUKAGE, Noriyuki)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究所・  
宇宙航空プロジェクト研究員  
研究者番号：50435806

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし