

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287031

研究課題名(和文) 可視広視野多チャンネル偏光撮像装置の開発とSGMAPの推進

研究課題名(英文) Development of Wide-field Optical Multi-band Polarimeter and Promoting SGMAP Project

研究代表者

川端 弘治 (KAWABATA, KOJI)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号：60372702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：世界初の北天可視偏光サーベイ計画SGMAPの実現へ向け、広視野多チャンネル偏光撮像装置の光学トレインの設計、及び偏光光学素子の設計と、一部素子の開発・評価を行った。広い視野と高い偏光測定精度を両立させるためには、大型で、広い許容入射角、広い帯域を兼ね備えた半波長板と偏光ビームスプリッターが要求される。本研究において、半波長板については設計レベルであるが要求性能を実現する目途が立った。偏光ビームスプリッターに関しては、ワイヤグリッドタイプの小型版の試作に続き、110mm×110mmの大型版を製作に成功し、良好な評価結果を得た。これにより、SGMAPを実現する観測装置の実現可能性が約束される。

研究成果の概要(英文)：For a realization of the project of optical polarimetry survey in northern hemisphere, we designed the main optical train of the wide-field, multi-band optical polarimeter, and designed and/or fabricated the key optical components of . To realize 'wide-field' and 'high precision polarimetry' simultaneously, the wave plates and the polarizing beam splitters should have (i) large dimensions, (ii) large acceptance of the incidence angle and (iii) wide wavelength coverage. In this study, for the half-wave plate, we successfully designed a Pancharatnam-type one which satisfies the required condition. For the polarizing beam splitter, we fabricated a small test piece and then a large, 110mm by 110mm ones and confirmed that they have good performance. With these results, the feasibility of the wide-field polarimeter for SGMAP has been promised.

研究分野：可視赤外線天文学

キーワード：可視赤外線天文学 銀河磁場 偏光測定 ナノテクノロジー

1. 研究開始当初の背景

星間赤化を伴う遠方の恒星の多くが有意な直線偏光を示すことが判ってから 70 年近くが経つ。これは、星間媒質中の固体微粒子が非球状の形をしており、且つ銀河磁場の影響を受けて整列しているためであると考えられており、その偏光のパターンは天球面上に投影した銀河磁場の良いプローブとなっている。しかし、既存の全天可視偏光カタログは、Heiles (2000) の 1 万星弱のものに留まっており、空間的な分解能が乏しいままである。そこで、我々は専用望遠鏡に広視野偏光撮像装置を搭載して、北天を掃天観測し、天の川銀河の詳細な磁場構造を探る SGMAP プロジェクトを推進している。このサーベイは世界的にもユニークであり、広い天文学分野での応用が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、SGMAP で用いる偏光撮像装置の光学系の設計と、一部の光学素子の製作を行うことを目的とする。高精度の偏光観測に欠かせないものの、これまで大型素子の開発が困難であり、広視野型の観測装置への応用が実質上閉ざされていた偏光ビームスプリッタを、近年のナノテクノロジーの応用で、広視野型光学系で利用可能とするところに最大の特色がある。また広視野でありながら複数チャンネル同時に測定可能な装置とする点も大きな特長である。広視野の装置は入射光のビームサイズが大きくなり、視野端付近の天体からの光線の光学軸に対する傾きも大きくなるため、巨大で許容角の大きな光学素子が必要になるが、そのような大型で均質な複屈折性結晶を用意することは難しい。

本研究では、基幹となる光学素子の実現の目的を立てると共に、特に開発難度の高いビームスプリッタについては最終品の製作までを行う。さらに、既存の観測装置を用いて、SGMAP の寄与が期待される観測的研究も実施することで、SGMAP によりスムーズに天文学的成果を挙げるための準備も進める。

3. 研究の方法

メイン光学トレイン設計に基づき (図 1)、広帯域半波長板、偏光ビームスプリッタ、及びダイクロイックプリズム (以後、単にダイクロ) の設計と一部開発を行う。本設計は当初、口径 2m の MAGNUM 望遠鏡を使用する方向で最適化し、チャンネル数も 3 つとしていたが、SGMAP 計画本体の予算獲得がならなかったことから、使用する望遠鏡を広島大学の口径 1.5m かなた望遠鏡とし、チャンネル数も 2 つに減らして低コスト化を図っている。この光学設計では、波長板は有効径 150mm、ダイクロは有効径 150mm、ビームスプリッタは有効径 120mm が必要である。各光学素子への入射光線は、視野角直径 50 分角に亘って光学軸のまわり 10° 以内となるような光学設計となっている。

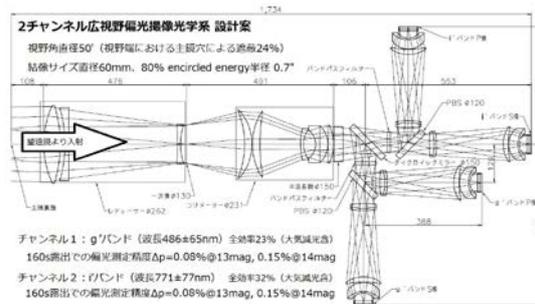


図 1 メイン光学トレイン設計光路図

広帯域半波長板については、実績のある Pancharatnum 型を用いつつ、入射角に応じた光路差を補償する工夫を採り入れることで、広許容入射角の実現を目指す。焦点面付近に導入する必要があることから、複数の素子を並べたモザイク型にすると観測不能領域が生じることから、なるべく一体物での実現を目指す。

偏光ビームスプリッタについては、このサイズになると複屈折性結晶を用いて構成することは不可能であることから、多層膜反射を用いたものとワイヤグリッドを用いたものの双方での実現を目指す。特にワイヤグリッドは近年のナノテクノロジーの発達により、透過光だけでなく反射光も精度の高い波面を保ち、ビームスプリッタとしての応用が期待されることから、有望である。新しい開発になるので、小型版の試作品をまず開発して、結果が良好であることを確認してから、最終版の開発を手掛ける。

なお、ダイクロについては、最終的に光学系を 2 バンド化と落とすことで、開発要素は特に無くなり、通常の技術で実現が可能となったことから、開発検討項目からは外した。

4. 研究成果

(1) メイン光学トレインの再調整

メイン光学トレイン (図 1) は、最終的に、広島大学 1.5m かなた望遠鏡に最適化したものとしており、2チャンネルとして、広視野ながら低コストでなるべくコンパクトとなる設計とした。本光学設計に基づいて光線追跡を行ったところ、かなた望遠鏡で視野直径 50 分角を実現しようとする、直径 36 分角よりも外側の入射光束に対し、主鏡材のカセグレン穴および副鏡縁による遮蔽されるケラレが発生し、視野端においては 2 割弱だけケラレることが判った (図 2)。これは、光量を減らすだけでなく、主鏡像による反射パターンの軸対称が崩れて器械偏光成分を増加させることが懸念されるので、なるべく解決させたい。実際、副鏡面を 57mm だけ主鏡から遠ざけると共に、副鏡面の曲率を変えて、望遠鏡全体の合成焦点距離を現状の 18503mm から 15694mm と短くすると、ケラレのない光学系を実現できることが判った。もし十分な資金が得られた場合には、そのような副鏡をそのように副鏡を作り直すことも検討する。

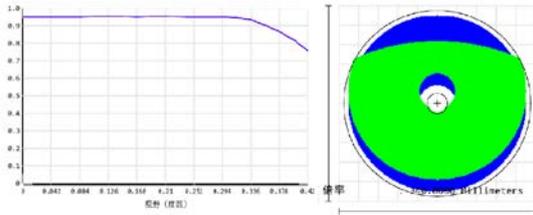


図2 かなた望遠鏡における遮蔽割合の視野角依存性(左)と視野端(直径50分角φ)からの入射光線群に対する副鏡部でのフットプリント。現行の副鏡では視野端において2割弱の遮蔽が生じる。

(2) 入射角補償型広帯域半波長板の設計

これまで我々は、国内メーカー製で、有効波長域 500-2400nm、実直径 100mm φ の超広帯域 Pancharatnum 型半波長板を製作した実績があったことから、それを基盤として設計を行った。要求性能は、有効径 150mm φ、有効波長域 380-900nm、位相差 $180 \pm 3^\circ$ 、許容入射角 $\pm 10^\circ$ 、透過率 80%以上で、一体ものであること、である。当初は、実績のある水晶とフッ化マグネシウムの組み合わせでの Pancharatnum 型半波長板で検討を進めていたが、大型の結晶をより安価に仕入れられる可能性がある水晶とサファイアの組み合わせによる検討も並行して進めた。

通常、半波長板における位相差は許容角に大きく、入射角 $\pm 10^\circ$ で位相差は 600° 以上も回転するなど、許容入射角は通常 1° 以下と狭い。今回の検討により、位相差の入射角依存性を補償するような簡易な波長板を作成して貼り合わせることで、許容入射角を各段に上げられることが分かった。図3に位相差の入射角依存性のシミュレーション結果を示す。水晶・サファイアの組み合わせで、入射角補償板を搭載したものに対する、波長 640nm 光のシミュレーションである。 $\pm 10^\circ$ の広い入射角にわたり位相差のずれが 2° 以内に抑えられていることがわかる。

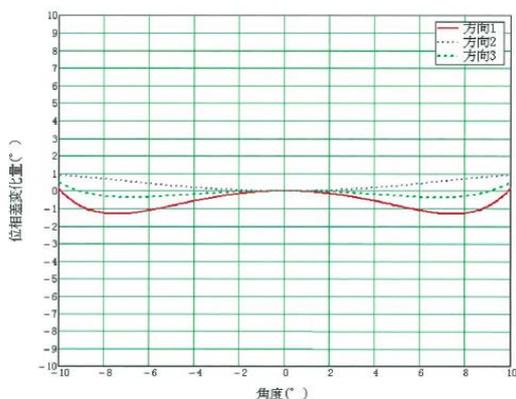


図3 設計した半波長板の位相差の 180° からのずれの入射角依存性のシミュレーション結果

その他の要求性能においても、水晶とフッ化マグネシウム、及び水晶とサファイアの組み合わせの両方で、結晶の調達も含めて達成可

能であることが判り、実現の目途を得ることができた。

(3) 大型偏光ビームスプリッタの開発

まず、誘電体多層膜を用いたものと、微細ワイヤグリッドを用いたもので実現性を検討した。

誘電体多層膜については、様々な膜設計シミュレーションを行い、入射角 $\pm 10^\circ$ 、帯域幅 120nm 程度において、偏光能率が5程度のは達成できる見込みがあるものの、目標とする 50 以上の偏光能率を有するビームスプリッタを安定して実現させることは困難であるという結論を得た。特に、多層膜の入射光・透過光強度は共に強い入射角依存性を持ち、波長依存性も大きいことから、広い帯域幅を持ち、入射ビームが角度幅を持つ通常の天文観測装置においては、多層膜タイプのビームスプリッタは致命的であることが判った。

次に、ワイヤグリッドタイプでの実現性を調べた。ワイヤグリッドは、これまででも透過光を完全偏光させる広帯域の偏光板として利用されてきたが、反射光は波面精度が悪く、可視域においてビームスプリッタとしての利用することは困難であった。しかし、近年、工作精度が向上し、高精度の反射波面を実現するワイヤグリッドが実現されるようになってきている。当初は、ビームスプリッタによる収差を小さく抑えるため、2つのプリズムを貼り合わせて構成される立方体(キューブ)型のビームスプリッタとすることとし、ワイヤグリッドは、プリズムの貼り合わせの面に生成させる必要があるため、それによる困難さが予想された。しかし、光学トレインを見直すことで透過光に生じる収差の補正が可能となり、図1のようにプレートタイプのビームスプリッタでも問題ないこととなり、その困難さは無くなった。

次に、ワイヤグリッドタイプのビームスプリッタの製作とその性能評価についてである。まず、有効波長域 400-700nm、50mm×50mm のプレートタイプのビームスプリッタを試作し、十分な偏光能率と有効波長幅を有することを確認した(図4)。

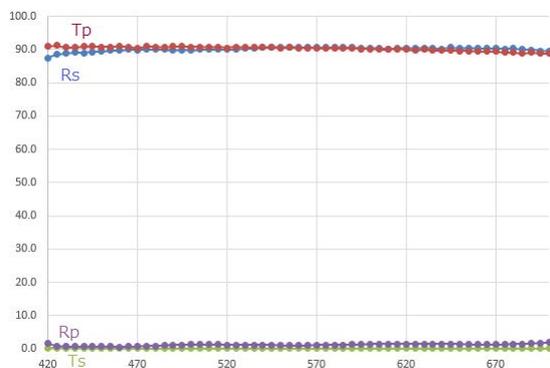


図4 ワイヤグリッドタイプのビームスプリッタにおける透過光の透過軸方向偏光成分(Tp)と垂直偏光成分(Ts)、及び反射光の透過軸方向偏光成分

分 (Rp) と垂直偏光成分 (Rs) の効率の波長依存性。横軸は波長 (nm)、縦軸は効率を表す。透過すべき偏光成分 (Tp)、反射すべき偏光成分 (Rs) とも 80%以上の効率を持つことがわかる。

そこで、光学メーカーとの協議により 110mm×110mm まで製作可能であることが判ったことから、110mm×110mm の大型のビームスプリッタを複数製作して、個体差、および一枚中のローカルな場所依存性を調べた。その測定には、偏光能率を $\Delta p=0.01\%$ 以下の高精度で自動評価する光学システムを光学定盤上に導入して行った (図 5)。これにより、波長 633nm の透過光の偏光度が、どの個体においてもほぼ全面に亘り、入射角 $45^\circ \pm 10^\circ$ の範囲内で 99.5%以上という良好な値を示すことを確認した。これは、広視野偏光撮像器から要求される仕様を十分に満たすものである。



図5 導入した偏光能率自動評価システム。光路中央部に 110mm×110mm のワイヤグリッド基板が光軸に対し 45° 傾けて設置されている。

以上のことから、SGMAP で用いる広視野偏光撮像器で根幹をなす光学素子の実現性の目途がたち、偏光ビームスプリッタについては十分な有効径を持つものを製作するところまで行うことができ (有効径が光学トレインでの条件値より若干小さいが、光学設計を若干見直すこと、及び複数枚並べることで対応は可能である)、当初の目標を達成することができた。

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 10 件)

- ① Morokuma, T., Tanaka, M., Asakura, Y., Abe, F., Kawabata, K. S., Uemura, M., Yoshida, M., et al., 「J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW 150914」, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り、68, 2016, id. L9, 6pages, DOI: 10.1093/pasj/psw061

- ② Itoh, R., Fukazawa, Y., Tanaka, Y. T., Kawabata, K. S., Uemura, M., Yoshida, M., et al., 「An emergence of a new polarized emission region in blazar Mrk 421 associated with an X-ray flare」, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有り、67, 2015, id. 45, 9pages, DOI: 10.1093/pasj/psv016
- ③ Kawabata, K. S., Akitaya, H., Yamanaka, M., Yoshida, M., Uemura, M., et al., 「Optical and Near-infrared Polarimetry of Highly Reddened Type Ia Supernova 2014J: Peculiar Properties of Dust in M82」, Astrophysical Journal Letters, 査読有り、795, 2014, id. L4, 5pages, DOI: 10.1088/2041-8205/795/1/L4
- ④ Akitaya, H., Moritani, Y., Ui, T., Kawabata, K. S., Yoshida, M. ほか、「HONIR: an optical and near-infrared simultaneous imager, spectrograph, and polarimeter for the 1.5-m Kanata telescope」、査読無、Proc. of SPIE, 9147, 2014, id. 9147O, 15pages, DOI: 10.1117/12.2054577

[学会発表] (計 6 件)

- ① 川端弘治、「可視偏光サーベイ計画 SGMAP: かなた望遠鏡での実施検討」、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年 3 月 15-18 日、九州大学 (福岡県・福岡市)
- ② 川端弘治、「可視偏光サーベイ SGMAP とタイムドメイン天文学」、木曾広視野サーベイと京都 3.8m 即時分光によるタイムドメイン天文学の推進、2017 年 2 月 21-22 日、京都大学 (京都府・京都市)
- ③ Koji S. Kawabata、「Future Project of Optical Polarimetry in Northern Hemisphere, SGMAP」, 2nd CORE-U International Conference: Cosmic Polarimetry from Micro to Macro Scales, 2017 年 2 月 17-18 日、Hiroshima Univ. (広島県・東広島市)
- ④ Koji S. Kawabata、「SGMAP: Optical Polarimetry Survey Project」、B Mode from Space, Part 1: Science foals, status of spaceborne projects, foregrounds, 2015 年 12 月 14-16 日、Kavli IPMU, Univ. of Tokyo (千葉県・柏市)
- ⑤ Koji S. Kawabata、「Optical and NIR observation of GRB afterglow」、GRB Workshop 2015、2015 年 8 月 31 日-9 月 3 日、理化学研究所 (埼玉県・和光市)
- ⑥ 川端弘治、秋田谷洋、吉田道利、植村誠 ほか、「近傍銀河 M82 に現れた赤化の大

きな Ia 型超新星 SN 2014J の偏光特性」、
日本天文学会 2014 年度秋季年会、2014
年 9 月 11-13 日、山形大学（山形県・山
形市）

〔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

SGMAP プロジェクトホームページ

<http://1601-031.a.hiroshima-u.ac.jp/sgmap/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川端 弘治 (KAWABATA, Koji)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号： 60372702

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

吉田 道利 (YOSHIDA, Michitoshi)

広島大学・宇宙科学センター・教授

研究者番号： 90270446

植村 誠 (UEMURA, Makoto)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号： 50403514

秋田谷 洋 (AKITAYA, Hiroshi)

広島大学・宇宙科学センター・特任助教

研究者番号： 60450186

(4) 研究協力者

松村 雅文 (MATSUMURA, Masafumi)

香川大学・教育学部・教授