

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25707011

研究課題名(和文) 激しい時間変動をともなう太陽磁気流体现象の解明に向けた高感度分光装置の開発

研究課題名(英文) Development of highly-sensitive spectrograph for studying dynamic MHD phenomena in the solar atmosphere

研究代表者

勝川 行雄 (Katsukawa, Yukio)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・助教

研究者番号：00399289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光球・彩層の可視・近赤外スペクトル線を高感度偏光分光観測する上で鍵となる技術の開発を行った。(1)波長500-1500nmに感度があるHgCdTe素子による高感度高速読出可能な近赤外線カメラを開発し、-140から-100 Kの範囲で素子を冷却制御し、偏光分光観測に要求される性能を明らかにした。(2)偏光維持矩形光学ファイバー束とそれを配置した小型面分光装置を開発し、光伝達特性と偏光維持性能を明らかにした。さらに、(3)ゼーマン・ハンレ効果の診断能力を定量化する研究を実施するとともに、ひので・IRIS衛星で観測された彩層高速ジェット現象で1万度から10万度以上まで加熱されることを発見した。

研究成果の概要(英文)：Key techniques were developed aiming for high-sensitivity spectro-polarimetry in the visible and near-infrared spectrum lines in this research project. (1) A near-infrared camera utilizing a HgCdTe sensor was developed. It was demonstrated that the sensor has fast-readout and sensitivity performance required in spectro-polarimetry in the wavelength range 500 - 1500 nm, (2) An integrated field unit utilizing optic fiber bundles was developed. The uniqueness is that the fiber bundle consists of rectangular fiber cores having polarization maintenance property. Its light-transfer and polarization property was clarified using newly developed rectangular fiber bundles. Furthermore, (3) Zeeman-Hanle diagnostic performance was demonstrated quantitatively using observation and numerical data. It was discovered that high-speed chromospheric jets in a sunspot heat the atmosphere from 10 kK to 100 kK using an observation with the Hinode and IRIS spacecrafts.

研究分野：天文学

キーワード：太陽物理学 彩層 ジェット 赤外線検出器 面分光装置 偏光分光観測 プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

「ひので」に代表される近年の高解像度観測により、温度1万度程度の彩層において、プラズマ噴出現象や多様なモードの磁気流体波動が観測されはじめた。これらの動的現象は彩層より上層のコロナ加熱や太陽風加速に必要な非熱的エネルギー(運動エネルギー・磁気エネルギー)を注入する役割を担っている可能性もあり、太陽観測において最重要ターゲットとなっている。従来の観測は彩層スペクトル線の単色画像における構造の変化として動的現象がとらえられたものであり、偏光分光観測に基づき速度や磁場が測定されたわけではない。動的な現象を駆動する物理過程の解明のためには、速度や磁場を定量的に測定し、両者の間の因果関係を明らかにすることが必要不可欠である。彩層では、熱的あるいは非熱的運動によりスペクトル線幅が広く、ゼーマン効果による偏光は極めて弱い。この状況を打開するために、ゼーマン効果による波長分裂が大きくなる近赤外線域で偏光分光観測を行うことが期待されている。また、ハンレ効果による彩層磁場診断も理論と観測の進展により実用化されつつある。偏光分光観測においては太陽といえども暗い天体である。現象の時間スケールよりも短時間に偏光測定精度に必要な光量を集める必要があり、そのために高感度かつ低ノイズの赤外線カメラと2次元面内で同時に偏光分光情報を取得できる面分光装置を有する偏光分光装置の開発が期待されている。

## 2. 研究の目的

次世代の近赤外線偏光分光観測装置において鍵となる2つの要素技術、高感度赤外線カメラと2次元面分光装置の開発を行う。ゼーマン効果・ハンレ効果による彩層磁場診断能力の高いカルシウム 854nm 線とヘリウム 1.1 $\mu\text{m}$  線をカバーする波長範囲 800nm ~ 1.5 $\mu\text{m}$  の波長域において、高感度(目標: 量子効率 70%以上)および低ノイズ(目標: 70 電子/読出)の性能を持ち、変化の速い現象に追従するため高速読出(30 フレーム/秒)が可能なカメラを開発しその性能を実証する。2次元面分光装置として、光学ファイバーを用いて2次元配列を1次元スリット状に変換し分光器に光を導く装置を開発する。高感度偏光分光観測に使用可能なものを目指しており、偏光維持性能を有する光学ファイバー束を開発することが最重要課題である。これらの開発と並行して、既存の観測装置によって取得された彩層スペクトル線の偏光分光データを用いてゼーマン・ハンレ効果による速度・磁場診断手法を検討し、時間変動の激しいジェット現象や磁気流体波動現象に対する診断能力を明らかにする。これらの成果をもとに、実際に太陽望遠鏡を用いた彩層スペクトル線の偏光分光観測を実施し、光球・彩層の超音速流によるプラズマ加熱過程を明らか

にすることを指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 近赤外線カメラの開発

目標とする性能を達成できる近赤外線カメラとして水銀カドミウムテルル(HgCdTe)素子によるカメラを開発する。太陽以外の天文観測ではすでに十分な実績がある一方、太陽観測においては、時間変化の激しい現象を観測するため高速読み出し(30 フレーム/秒)が必要になり、その時の線形応答性やノイズ性能は確立されていない。HgCdTe素子と高速読み出しに対応可能な読出装置を入手し、国立天文台先端技術センターにて性能評価を行う。高速読出しのメリットは、暗電流を抑えられるため比較的高温(-100 $^{\circ}\text{C}$ 近辺)で運用できることである。すばる望遠鏡用カメラや人工衛星搭載機器の開発で実績のある国立天文台先端技術センターにて、素子温度を制御できる検出器評価システムを新しく構築し、検出器温度が線形応答性やノイズ性能に与える影響を評価する。高速読出できるシステムは検出器メーカーと共同で開発する。

### (2) 面分光装置の開発

ファイバー総本数 1000 本以上からなる面分光装置を開発する。最もクリティカルな性能要求は偏光維持性能である。通常用いられる円形コアファイバーは偏光維持性能を持たない。コア形状を矩形にすることで、矩形の長軸・短軸方向の直線偏光を保持するファイバー束を新規開発する。既存の矩形コアファイバーの光伝達特性を観測波長範囲で評価し、矩形コア形状とクラッド厚の最適化設計を行う。既存の分光器に設置することを想定しているためコンパクトなファイバー素子(約 30 $\mu\text{m}$  幅)を配列したものを製作する必要がある。ファイバーの偏光維持性能の評価は、太陽観測用偏光解析装置を有する京都大学飛騨天文台と協力して行う。

### (3) 彩層診断手法と彩層高速現象の研究

彩層磁場診断に最適なヘリウム 1.1 $\mu\text{m}$  線の偏光線輪郭を解析できるコードとしてカナリア諸島天文物理学研究所で開発された HAZEL (HANle and ZEeman Light)を用いる。彩層の電磁流体现象で観測される偏光データを HAZEL で模擬計算し、速度・磁場の時間変動が観測できるかを明らかにする。カナリア諸島ドイツ塔望遠鏡やサクラメントピーク天文台で実際に得られたヘリウム線観測データを用いて、HAZEL によるゼーマン・ハンレ効果診断の優位性を示す。彩層高速現象の研究には「ひので」衛星や IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) 衛星で得られる光球・彩層の高解像度分光データも活用する。

## 4. 研究成果

### (1) 近赤外線カメラの開発

ヘリウム 1.1  $\mu\text{m}$  線とカルシウム 854 nm 線の彩層ラインを高感度で偏光分光観測するため、これらの波長で量子効率 0.7 以上を達成できる HgCdTe 検出器 H2RG (2k x 2k, Teledyne 社製) とその読出装置 SIDE CAR を入手しその性能評価を実施した。1.7  $\mu\text{m}$  カットオフ H2RG 素子は比較的高温 (-100 $^{\circ}\text{C}$  程度) 環境でも暗電流を小さくできるメリットがあるが、その温度での性能はこれまで調べられていない。そこで、液体窒素冷却とヒーターにより素子温度を -140 $^{\circ}\text{C}$  から -70 $^{\circ}\text{C}$  の範囲で温度制御するデュワーシステムを国立天文台先端技術センターの協力のもと開発した (図 1)。これにより、カメラ性能検証を行うシステムを構築し、低速読出 (16bit, 0.8 フレーム/秒) 及び高速読出 (12bit, 18-36 フレーム/秒) での線形性、暗電流、ノイズについての評価を行った。

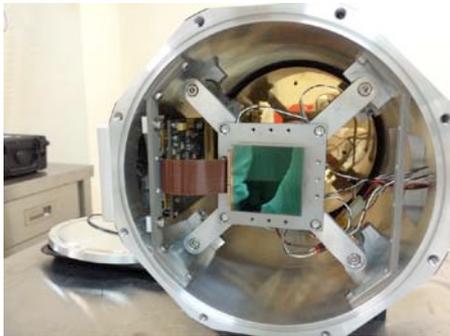


図 1: 液体窒素デュワー内の中央に H2RG 素子、左側に素子読出装置 SIDE CAR を配置したカメラ性能評価システム。

H2RG 素子の最大の特徴は可視光から近赤外の広い波長範囲で高い感度を有することである。本課題による測定では、波長 500 -600nm で量子効率は約 50%、波長 700 -1100nm の範囲で 60-70% の量子効率であることを確認した。H2RG 素子の飽和電荷量は素子温度が -120 $^{\circ}\text{C}$  以下で  $1 \times 10^5$  電子以上であること、飽和まで良好な線形応答性を示す (5% 以内) ことを実測した。高精度偏光観測のためにはカメラを高速で読み出し天体から来る光を逃さず使う必要があるが、リセット-リード読出ノイズは低速読出時に 70-85 電子程度、高速読出時に 80-100 電子程度となった。想定していた読み出しノイズよりも大きい、光子ショットノイズと比較して小さいため許容できる。読出装置 SIDE CAR の温度が高い (-10 $\sim$ 20 $^{\circ}\text{C}$ ) 状態での測定であるため、それを冷却することでノイズ性能を改善できる可能性がある。

本課題で構築したシステムにより 1.7  $\mu\text{m}$  カットオフ H2RG 素子の暗電流の温度依存性を精度よく測定することができた。その結果 -90 $^{\circ}\text{C}$  以下に冷却すれば、高速読出 (10 フレーム/秒以上) 時に読出ノイズより十分小さい暗電流 (20 電子以下) にできることを明らかにした (図 2 上)。一方ホットピクセル (観測に使えない画素) の割合が、素子温度に依存

して急激に変化することも判明した。偏光観測に使用するには -100 $^{\circ}\text{C}$  以下に冷却することが必要である (図 2 下)。地上望遠鏡による太陽観測では素子の冷却は問題にならないが、将来の宇宙ミッションで使用する場合には到達できる温度の検討を要する。

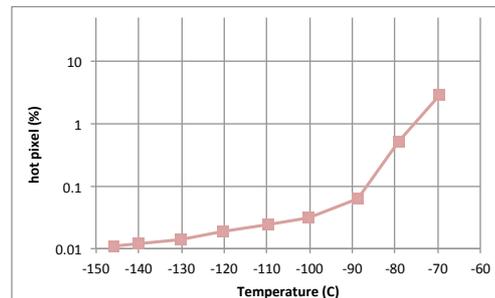
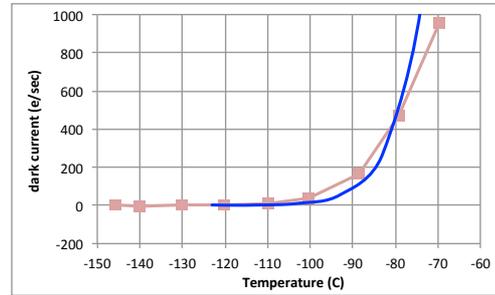


図 2: 暗電流 (上) とホットピクセル割合 (下) の温度依存性。

## (2) 面分光装置の開発

面分光装置は 2 次元同時に偏光分光情報を取得できる一方、スリット分光はスループットや波長分解能の点で有利となる。そこで、通常のスリットと面分光装置をどちらも焦点面上に配置する方式として、光学ファイバーを用いた L 字型面分光装置を用いる方式の設計を行った (図 3)。極めてコンパクトに面分光装置を配置できることが特徴である。光学ファイバーとして、偏光維持性能を有する矩形コアファイバー束を用いる。そこで、まず、面分光装置用の矩形コア光学ファイバーの開発を Collimated Holes 社と共同で行った。8  $\mu\text{m}$   $\times$  29  $\mu\text{m}$  のファイバーコアを 136 個リボン状に並べたファイバー束 (全長 1.5mm) を製作することに成功した (図 4)。

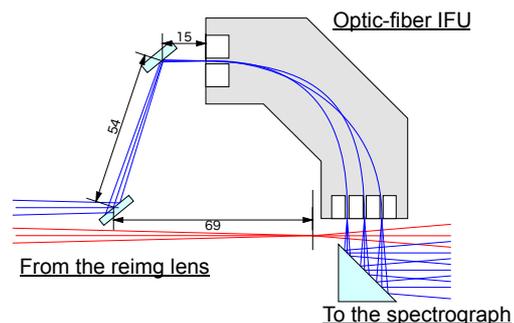


図 3: ファイバー束を用いた L 字型面分光装置の模式図。

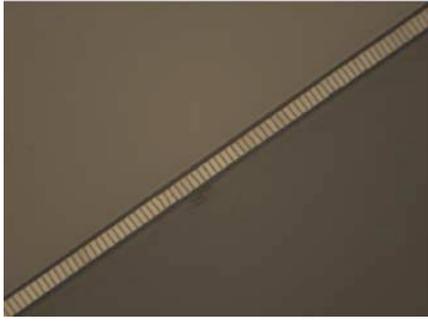


図 4: 新規開発した  $8\mu\text{m}\times 29\mu\text{m}$  コアを 136 個並べた面分光装置用光学ファイバー束。

次に、光学ファイバー束を金属筐体に固定する方式を設計した。ファイバーを接着剤で筐体に固定する必要があるが、ファイバー間の隙間に充填するため硬化前は流動性が高く、硬化後も柔らかくファイバーへストレスを与えない接着剤が必要となり、シリコン樹脂 DC SE 9187L を選定した。将来の宇宙ミッションへの応用も視野に入れているためアウトガスも実測し、低アウトガスであることを確認している。矩形コアファイバーの偏光維持性能は京都大学・飛騨天文台と共同で測定を行った。矩形コアの長軸方向・短軸方向の直線偏光を維持することを確認した。一方、光学ファイバーを伝播する際に直線偏光と円偏光等との混信(クロストーク)が発生することも判明した。これはファイバーへのストレスによって発生することを特定しており、シリコン接着剤でファイバーを固定した場合、影響を小さくできるが、依然として発生してしまう。既知の偏光状態が光学ファイバーによってどう変調をうけるかを測定することで、クロストークの影響を較正する必要がある。

これらの成果をもとに、L字型面分光装置を製作した。入射側では矩形コア光学ファイバー束 10 本を並列に配置し(すなわち、全コア数は 1360 個)、出射側では 5 本のファイバーを直線状に配置したスリット 2 本を形成する(図 5)。シリコン樹脂 DC SE 9187L で金属筐体内を充填しファイバー束を固定した。太陽彩層の 2 次元面分光観測に即座に使用することができる。

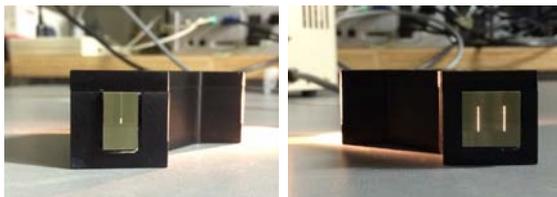


図 5: 製作した L 字型面分光装置、10 本のファイバーを並列に配置した入射側(左)と 2 本のスリットに変換する出射側(右)。

### (3) 彩層診断手法と彩層高速現象の研究

彩層スペクトル線、特にヘリウム 1083nm 線におけるハンレ効果が彩層活動現象を診断する性能を有することを実証する研究を行った。ゼーマン・ハンレ効果に基づく偏光線輪郭解析コード HAZEL を用い、ヘリウム 1083nm 線における偏光分光信号を再現する計算を行い、直線偏光信号とその時間変化を検出することで電磁流体波動のモードを特定できる可能性を示した。将来の地上観測や太陽観測衛星 SOLAR-C による高精度近赤外線偏光分光観測で狙う科学課題に重要な示唆を与えたと考えている。

また、「ひので」衛星と IRIS 衛星で観測された黒点内で発生する彩層ジェット現象において、彩層ジェットの先端が彩層 1 万度よりも 10 倍温度が高い 10 万度以上にまで加熱されていることを発見した。磁気リコネクションによって発生した磁気流体波が高速伝播することで上空大気を加熱する可能性を提案しており、国際会議で発表するとともに、現在論文を投稿中である。

### 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 9 件)

- ① C. Quintero Noda, T. Shimizu, J. de la Cruz Rodríguez, Y. Katsukawa, K. Ichimoto, T. Anan, Y. Suematsu, “Spectropolarimetric capabilities of Ca II 8542 Å line”, 2016, MNRAS, 査読有, 2016, 459, 3363-3376  
DOI: 10.1093/mnras/stw867
- ② M. Gošić, L. R. Bellot Rubio, J. C. del Toro Iniesta, D. Orozco Suárez, Y. Katsukawa, “The Solar Internetwork. II. Flux Appearance and Disappearance Rates”, 2015, Astrophysical Journal, 査読有, 820, 35 (8pp)  
DOI: 10.3847/0004-637X/820/1/35
- ③ S. Toriumi, M. C. M. Cheung, Y. Katsukawa, “Light Bridge in a Developing Active Region. II. Numerical Simulation of Flux Emergence and Light Bridge Formation”, Astrophysical Journal, 査読有, 2015, 811, 138 (13pp)  
DOI: 10.1088/0004-637X/811/2/138
- ④ S. Toriumi, Y. Katsukawa, M. C. M. Cheung, “Light Bridge in a Developing Active Region. I. Observation of Light Bridge and its Dynamic Activity Phenomena”, Astrophysical Journal, 査読有, 2015, 811, 137 (13pp)  
DOI: 10.1088/0004-637X/811/2/137
- ⑤ M. Gošić, M., L. R. Bellot Rubio, D. Orozco Suárez, Y. Katsukawa, J. C. del Toro Iniesta, “The Solar Internetwork.

- I. Contribution to the Network Magnetic Flux”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 2014, 797, 49 (11pp)  
DOI: 10.1088/0004-637X/797/1/49
- ⑥ T. Schad, H. Lin, K. Ichimoto, Y. Katsukawa, “Polarization properties of a birefringent fiber optic image slicer for diffraction-limited dual-beam spectropolarimetry”, *Proceedings of the SPIE*, 査読有, 2014, 9147, 91476E (13pp)  
DOI: 10.1117/12.2057125
- ⑦ Y. Suematsu, Y. Katsukawa, H. Hara, R. Kano, T. Shimizu, K. Ichimoto, “Large aperture solar optical telescope and instruments for the SOLAR-C mission”, *Proceedings of the SPIE*, 査読有, 2014, 9143, 91431P (9pp)  
DOI: 10.1117/12.2054373
- ⑧ K. Reardon, A. Tritschler, Y. Katsukawa, “Spectral Signatures of Penumbra Transients”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, 779, 143 (12pp)  
DOI: 10.1088/0004-637X/779/2/143
- ⑨ K. -S. Cho, S. -C. Bong, J. Chae, Y. -H. Kim, Y. -D. Park, Y. Katsukawa, “FISS Observations of Vertical Motion of Plasma in Tiny Pores”, *Solar Physics*, 査読有, 2013, 288, 23-37  
DOI: 10.1007/s11207-012-0196-1

[学会発表] (計 17 件)

- ① Y. Katsukawa, Y. Kamata, T. Anan (他 5名), “Development of a near-infrared detector and a fiber-optic integral field unit for a space solar observatory SOLAR-C”, *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, 28 June 2016, Edinburgh (UK)
- ② 勝川行雄, 鎌田有紀子, 原弘久, 末松芳法, 坂東貴政, 阿南徹, 一本潔, 清水敏文, 「SOLAR-C 偏光分光観測のための近赤外線カメラと面分光装置の開発」, 日本天文学会 2016 年春季年会, 2016 年 3 月 14 日, 首都大学東京(東京都八王子市)
- ③ Y. Katsukawa, Y. Kimura, T. J. Okamoto, T. Tarbell, “Hinode-IRIS observation of penumbral microjets in the chromosphere and their transition region counterpart”, *Hinode 9 International Science Meeting*, 17 Sep 2015, Belfast (UK)
- ④ Y. Katsukawa, Y. Kimura, T. J. Okamoto, T. Tarbell, “IRIS observation of penumbral microjets in the chromosphere and their transition region counterpart”, *IRIS-4 Workshop*, 20 May 2015, Boulder (USA)

- ⑤ 勝川行雄, 原弘久, 末松芳法, 鎌田有紀子, 一本潔, 清水敏文, SOLAR-C WG, 「SOLAR-C 光学磁場診断望遠鏡(SUVIT): 高精度偏光分光観測に向けた面分光装置と近赤外線カメラの性能と課題」, 日本天文学会 2015 年春季年会, 2015 年 3 月 19 日, 大阪大学(大阪府豊中市)
- ⑥ 勝川行雄, 「SOLAR-C の彩層偏光分光観測で探る太陽大気加熱機構」, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 2014 年 9 月 13 日, 山形大学(山形県山形市)
- ⑦ Y. Katsukawa, “Reconnection in the solar magnetic fields beyond HINODE”, *The 40th COSPAR Scientific Assembly*, 3 Aug 2014, Moscow (Russia)
- ⑧ 勝川行雄, 原弘久, 末松芳法, 鹿野良平, 一本潔, 清水敏文, 松崎恵一, 鹿島伸悟, H. Lin, 「SOLAR-C 光学望遠鏡(SUVIT): 偏光分光観測装置の光学系検討」, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 20 日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)
- ⑨ 勝川行雄, 大井瑛仁, K. Reardon, A. Tritschler, 「半暗部マイクロジェット分光観測」, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 20 日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)
- ⑩ Y. Katsukawa, “Imaging and spectroscopic studies of rapid events in the solar chromosphere”, *12th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space*, 2013 年 7 月 1 日, 白馬東急ホテル(長野県白馬村)

[その他]

ホームページ

<https://sites.google.com/site/katsukawayukio/publications>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝川 行雄 (KATSUKAWA, Yukio)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・助教

研究者番号: 00399289