

## 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：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400230

研究課題名(和文) チューナブルフィルターを用いた彩層偏光観測装置開発

研究課題名(英文) Development of the imaging polarimeter combined with the new narrow-band universal tunable filter

研究代表者

萩野 正興 (Hagino, Masaaki)

国立天文台・太陽観測所・専門研究職員

研究者番号：90437195

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：太陽彩層での像分光を実現する新しい狭帯域チューナブル・フィルターを開発した。このフィルターは高速チューニング(約0.1秒)を実現し、機械駆動(油層)を排除し、広波長域(510-1100nm)をカバーする。このフィルターを用い2015年1月に中国雲南省1m真空太陽望遠鏡で高解像度の太陽フレアや彩層微細構造のデータを取得した。一方、狭帯域チューナブル・フィルターと組み合わせて用いるイメージング偏光解析装置を開発してきた。この装置は回転波長板を用いた彩層マグネトグラフ(通称：Chro-Mag-Ro)と名付けた。このChro-Mag-Roを用いて、2016年1月に活動領域の円偏光分布を観測した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new narrowband tunable filter to perform imaging spectroscopy of the solar chromosphere. It is possible to make high speed tuning (about 0.1sec), to exclude mechanical drives (and oil tank), and to cover a wide wavelength range (510--1100nm). Using the filter, a series of high-resolution images were obtained with the 1m vacuum solar telescope at the Fuxian Solar Observatory on January 2015. We succeeded in observing several flares and fine structures of the chromospheric layer. On the other hand, we have developed an imaging polarimeter combined with the universal tunable filter. The polarimeter name is the Chromospheric Magnetograph with a Rotate wave-plate (called Chro-Mag-Ro). We observed circular polarization distribution around an active region on January 2016.

研究分野：太陽物理

キーワード：太陽彩層偏光観測 チューナブル・フィルター

## 1. 研究開始当初の背景

ひのでの高解像撮像観測により、太陽の外層大気は磁場を伴い時間的に激しく変化するプラズマ現象で埋め尽くされていることが明らかになった。そこには対流と磁場の相互作用によって生じる波動や衝撃波、磁気リコネクションによる(と考えられる)エネルギー解放、プラズマ噴出や粒子加速現象等が絶え間なく生起しており、とくに光球とコロナの間に位置づけられる彩層にはこれら大小スケールの磁氣的活動現象がひしめき合っていることが発見された。これらの連鎖によって太陽外層の高温大気(コロナ)や惑星間空間の環境が形成されると考えられ、その物理過程を解明することは、広く天体プラズマ現象の理解の基礎を与えるのみならず、宇宙地球環境の研究にとっても重要である。

近年、盛んに太陽彩層の分光偏光観測が進められている。太陽フレアをはじめとする彩層のダイナミックな現象を捉えるためには高時間分解能分光観測をする必要がある。このため、高時間分解能の分光観測は様々な角度から検討されているが、波長方向へのスキャン、つまり高速で波長スキャンが可能な光学フィルターを用いた観測についてはほとんど検討されてこなかった。従来分光器を用いた分光偏光観測ではスリットで太陽面を空間的にスキャンする手法のため、二次元の分布を取得するのに長い時間がかかる。このため、空間的に広がる短時間で変化するダイナミックな現象を捉えることができない。

京都大学飛騨天文台において、一本潔教授を中心に次期太陽観測衛星 Solar-C への搭載を目指した狭帯域チューナブル・フィルターの開発が始まっていた。

このフィルターはこれまで太陽イメージング観測で用いられてきたリオ・フィルターと呼ばれる光学フィルターを改良したものである。リオ・フィルターは偏光板と複屈折結晶である方解石や水晶を組み合わせ、その光学素子の遅延量を利用し狭帯域の波長を透過させる。従来のリオ・フィルターはターゲットの波長にチューニングする際、機械的に光学素子を回転させて遅延量の組み合わせを調整する。一方、新しい狭帯域チューナブル・フィルターでの波長チューニングの方法では液晶遅延素子に適切な電圧を印加することで実現する。この方式では機械的に駆動する部分を取り除くことが可能となり、様々な利点が派生した。まず、第一の利点はチューニングのスピードである。従来の機械駆動式リオ・フィルターでは数秒から数分かかっていた波長チューニングが、液晶遅延素子を用いた方式では 0.1 秒で波長チューニングが行える。次に、従来の方法では機械により素子を回転させるためシリコンオイルで満たされた油槽が必要であったが、新しい方法では機械で駆動する部分がないので油槽は必要ない。この油槽を用いないことにより、

Solar-C でこの新方式のフィルターを用いる場合、気泡が入らないことや軽量化、小型化などの利点も多い。さらに、機械駆動の場合、光学素子の角度の位置決め精度はフィルター透過波長の精度に大きく影響する。一方で、液晶遅延素子に適切な電圧を印加する場合、各液晶遅延素子の偏光特性を試験して遅延量を決め、機械駆動方式と比較して高い精度で波長チューニングを行うことが可能である。

## 2. 研究の目的

京都大学附属天文台で開発中の波長スキャンにより短時間に分光観測を可能にする狭帯域チューナブル・フィルターの開発を行い、本研究で作成する高精度の偏光解析装置を用いて太陽彩層の偏光観測を行う。まず、狭帯域チューナブル・フィルターと偏光解析装置を性能評価する。次に太陽彩層に広がるダイナミックな現象を分光偏光観測し磁場、速度場、密度などの物理量を導出する。さらに、海外大型望遠鏡のバックエンド装置としての利用がどう影響するかを考察する。偏光解析装置は海外大型望遠鏡に使用することを考慮して、汎用性の高いデザインとする。本研究は狭帯域チューナブル・フィルターを太陽彩層における偏光観測に応用したもので、他に類似の研究例を見ない。したがって、分光偏光観測の分野に新しい視点を与える。このような技術発展により、将来建設が計画されている海外の大型太陽望遠鏡にとりつけるバックエンド装置の開発に大きく貢献できる。

## 3. 研究の方法

本研究は2つの段階を経て遂行された。まず、第一段階として狭帯域チューナブル・フィルターの開発とその観測精度の測定である。第二の段階として、このフィルターと組み合わせて使用する偏光解析装置の開発と太陽彩層における偏光観測である。

はじめに第一段階について説明する。本研究を開始した当初、すでに京都大学附属天文台では狭帯域チューナブル・フィルターの開発はスタートしていた。まず、このフィルターを完成させ、分光偏光観測に使用可能な特性評価を行う必要があった。この計画で製作した狭帯域チューナブル・フィルター技術試験モデルの構成を図1に示す。方解石ブロックは京都大学飛騨天文台の所有するH $\alpha$ 用リオ・フィルターから供出され、透過波長幅 0.25Å (@656.3nm)、7ステージの構成であり、全長はおよそ 30cm である。方解石の開口は 32mm $\square$ であるが、光学素子を貼り合わせたとき液晶遅延素子の間隙にかかる応力を低減するために、有効開口サイズは 30mm $\square$ とした。波長シフトを液晶遅延素子によって電氣的に行うことで、波長板の回転

機構を排除した。この図の下には各光学素子の偏光軸の向きを示す。

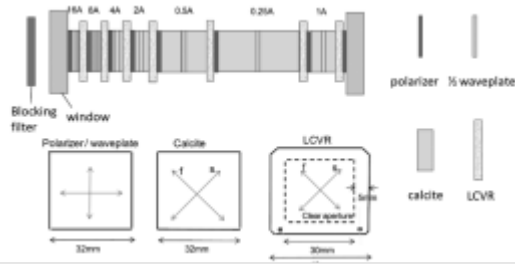


図 1 狭帯域チューナブル・フィルターの構成。

このフィルターを構成する各光学素子の偏光特性を検査した。その一例(液晶遅延素子)を図 2 に示す。左図は液晶へ電圧を印加したときの遅延量の変化と遅延軸の方向の変化を示している。右図は電圧と波長に対する遅延量の分布を表している。

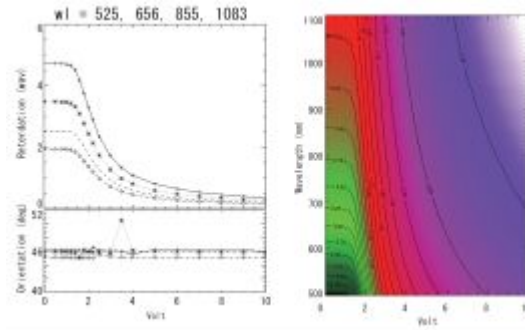


図 2 偏光特性試験の例(液晶遅延素子)。

図 3 に試験環境温度 16 度、656nm での波長チューニング精度を表す。左図が液晶印加電圧に対する遅延量の誤差を示し、右図が印加電圧、波長に対する遅延量誤差を表している。縦実線は液晶使用範囲を表しており、等高線で示す。使用範囲ではほとんど誤差範囲内という事が確認できた。

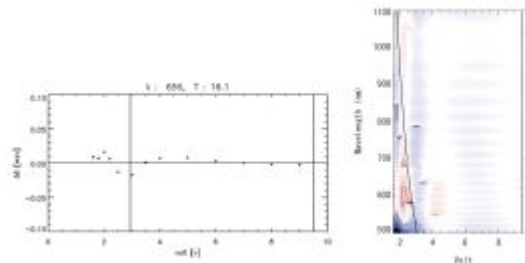


図 3 波長チューニングの精度。

これらの事から次世代狭帯域波長チューナブル・フィルターの心臓部である液晶可変遅延素子の遅延量を波長、印加電圧、温度、入射角の関数として取得した。510nm-870nm で可動可能な狭帯域チューナブル・フィルターの実現に見通しができた。

次に第二段階として、第一段階で開発した

狭帯域チューナブル・フィルターと組み合わせる偏光解析装置を開発する。この偏光解析装置は高速で回転する中空アクチュエーターとそこに組み込まれた波長板で構成される。回転機構としてオリエンタルモーター社製の中空アクチュエーターを使用した。このアクチュエーターは毎分 200 回転するものを選定した。このことにより 1 秒間に取得できる全偏光状態は 6 シリーズである。この中空アクチュエーターにはルケオ社と京都大学飛騨天文台が共同開発した遅延量 127 度の波長板を組み込む。図 4 に本研究で使用する波長板の波長に対する偏光特性を示す。この図では波長に対する遅延量と軸の方向性の変化で、左図には設計値を、右図には実際の測定値を示す。この結果から 510nm-1100nm の範囲で条件を満たす波長板を開発できた。

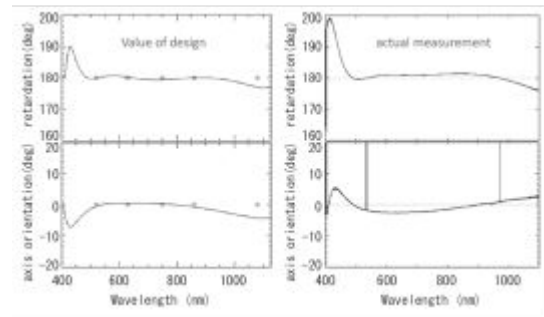


図 4 波長板の偏光特性。

#### 4. 研究成果

本研究の成果としては次の 3 つが挙げられる。

- (1) 京都大学飛騨天文台での狭帯域チューナブル・フィルターのファーストライト。
- (2) 中国国家天文台雲南天文台の撫仙湖太陽観測所の大型望遠鏡での観測。
- (3) 国立天文台太陽観測所気球実験棟シーロスタートを用いた偏光観測。

まず、(1) について報告する。狭帯域チューナブル・フィルターが完成した後に、京都大学飛騨天文台にある口径 60cm のドームレス望遠鏡を用いて分光観測、イメージング観測を行い、フィルターの最終的な確認を行った。これが我々の開発したフィルターのファーストライトである。分光観測のファーストライトは 2013 年 6 月 18 日に行われ、H $\alpha$  線(656.3nm)付近で透過率などを確認した。この結果を図 5 と図 6 に示す。この観測で開発してきたフィルターの特性が分かった。このフィルターの波長透過幅は予定されていた 0.025nm を達成しており、従来のリオ・フィルターが 10% 程度の透過率を持つのに比べて、我々のフィルターは 15% の透過率を持つ明るいフィルターであることが分かった。

一方、イメージング観測のファーストライト

トは 2013 年 9 月 26 日に行われ、フィルターの波長スキャンにより得た像からスペクトル線の再現に成功した。これを図 7 と図 8 に示す。

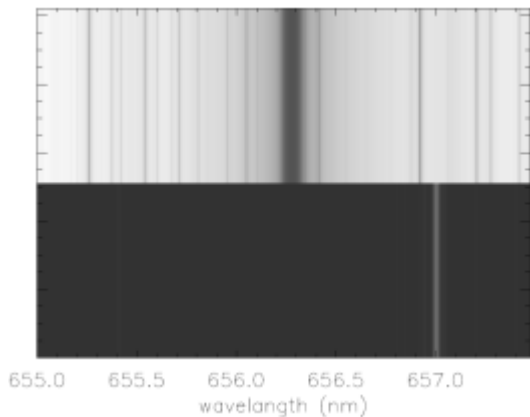


図 5 上：H $\alpha$  線(656.3nm)付近のスペクトル線。下：フィルターの透過光。

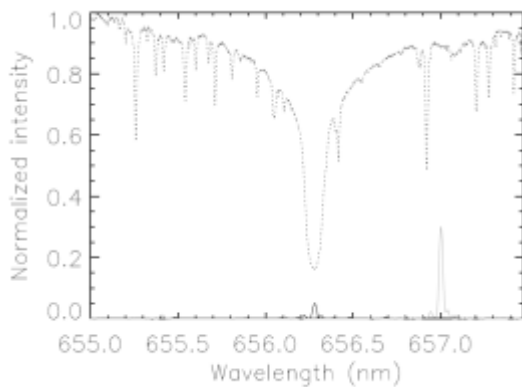


図 6 フィルターの透過光のプロファイル。破線は H $\alpha$  線スペクトルのプロファイル。

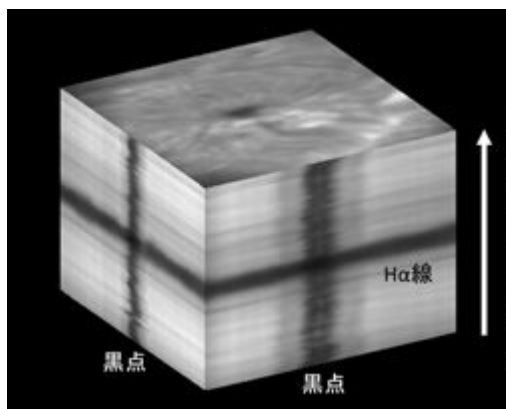


図 7 狭帯域チューナブル・フィルターを波長方向にスキャンして得られた黒点領域のデータキューブ。横方向が空間を表し、垂直方向が波長スキャンした方向を表す。

これらの結果はカナダ・モントリオールで行われた国際光工学会 SPIE で発表し、プロシーディングに収録された。

次に (2) の成果について説明する。このフィルターを開発する目的は次期太陽観測衛星 Solar-C や地上大型望遠鏡のバックエンド装置としての使用を目指して、基礎技術を

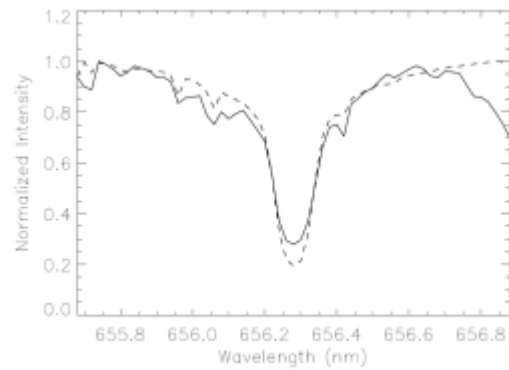


図 8 波長スキャンした像の明るさから再現された H $\alpha$  線 (実線)。破線は分光観測によるスペクトル線のアトラス。

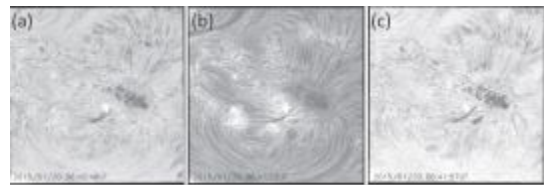


図 9 撫仙湖太陽観測所におけるファーストライト。(a)波長の中心から-0.05nm、(b)波長中心 656.3nm、(c)波長中心から+0.05nm。

獲得することである。我々はこのフィルターを大型地上望遠鏡で使用する導入として、2015 年 1 月に中国国家天文台雲南天文台が所有する撫仙湖太陽観測所の口径 1 m の新真空太陽望遠鏡を使用し、太陽彩層イメージング観測を行った。図 9 はこの望遠鏡を用いた H 線像のファーストライトである。この像は大気揺らぎの効果を少なくして像復元を行うスペックルマスキング法を施している。

この期間にいくつかの太陽フレアを観測した。特に 2015 年 1 月 30 日に同じ領域で起きた太陽フレアは高速のフィラメントの運動を伴った。このフィラメントの水平方向の運動を見積もったものを図 10 に示す。これらの結果はポルトガル・コインブラで開催された国際会議 OGAUC と韓国・ソウルでの APSM2016 の国際会議で発表され、OGAUC のプロシーディングに収録された。

最後に (3) の成果について報告する。本研究の最終目的は狭帯域チューナブル・フィルターと組み合わせて使う偏光解析装置で太陽彩層の偏光観測を行うことである。この装置は回転波長板を用いた偏光観測装置ということで、この装置の名前を Chromospheric Magnetograph with a Rotating wave-plate とし、通称を Chro-Mag-Ro とした。この装置での観測ターゲット波長は Ca854.2nm である。2015 年 9 月にこれまで開発してきたすべての装置を京都大学飛騨天文台ドームレス望遠鏡の光路中に設置し、偏光観測を行った。これが実際のファーストライトであるが、雲が多かったため解析するデータが取得できなかった。

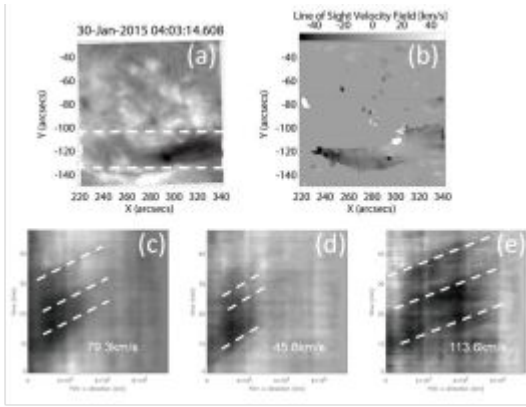


図 10 M クラスのフレアを起こした活動領域 NOAA 12268。(a)H $\alpha$  線像、(b)視線方向速度場、(c)波長中心での水平方向速度の見積もり、(d)波長中心-0.05nm での水平速度の見積もり、(e)波長中心+0.05nm での水平速度の見積もり。(c)-(e)の速度は(a)の破線内のフィラメントの運動を用いている。

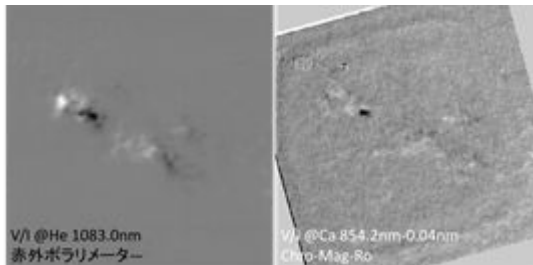


図 11 左図：同じキャンパス内で同時観測を行っていた太陽フレア望遠鏡の赤外ポラリメーターで取得された He 1083.0nm の円偏光成分。右図：Chro-Mag-Ro で取得された円偏光成分。

そこで、2016 年 1 月に国立天文台太陽観測所の協力で、三鷹キャンパス内気球実験棟のシーロスタットを用いて、偏光観測を遂行した。関東地方特有の冬型の気圧配置のせいで大気の揺らぎが大きく、位置ずれのノイズが多かったためノイズレベルが大きい直線偏光成分は測定できなかったが、円偏光成分の取得には成功した。その結果を図 11 に示す。この結果は日本天文学会 2016 年春季年会で発表された。

本研究で獲得された狭帯域チューナブル・フィルターの基礎技術は京都大学飛騨天文台の SMART 望遠鏡に応用され定常観測用 2 号機が開発された。また本研究で開発したフィルターは今後京都大学飛騨天文台や中国国家天文台の大型望遠鏡での観測に用いられる。さらに Chro-Mag-Ro も雲南天文台撫仙湖太陽観測所で使用され観測が行われる方向で計画が進んでいる。

## 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 2 件)

Hagino, M., Ichimoto, K., Ueno, S., Kimura, G., Otsuji, K., Kitai, R., Zhong, L., Xu, Z., Shinoda, K., Hara, H., Suematsu, Y., Shimizu, T., “Development of the Universal Tunable Filter and High-resolution Imaging Observation with the Fuxian Solar Observatory”, ASPC, 504, 103, 2016 (査読なし)

<http://aspbooks.org/custom/publication/s/paper/504-0103.html>

Hagino M., Ichimoto K., Kimura G., Nakatani Y., Kawate T., Shinoda K., Suematsu Y., Hara H., and Shimizu T., “Development of a universal tunable filter for future solar observations”, SPIE, 9151, 915115V, 1-4, 2014. (査読なし)

DOI:10.1117/12.2055728

[学会発表](計 16 件)

萩野正興, 阿南徹, 一本潔, 木村剛一, 上野悟, 金田直樹, 篠田一也, 花岡庸一郎, “太陽彩層偏光観測装置 (Chro-Mag-Ro) の開発状況”, 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京, 東京都八王子市, 2016 年 3 月 14 日-17 日

萩野正興, “太陽彩層偏光観測装置 (Chro-Mag-Ro) の開発と京都大学飛騨天文台ドームレス望遠鏡での観測”, 太陽研連シンポジウム「ひので 10 年目の成果と Solar-C を柱とする太陽研究の新展開」, 国立天文台, 東京都三鷹市, 2016 年 02 月 15 日-17 日

木村剛一, 一本潔, 萩野正興, 仲谷善一, 上野悟, 篠田一也, 原弘久, 末松芳法, 清水敏文, “狭帯域チューナブル・フィルターの開発 ~ 製作についての報告 ~”, 天文学に関する技術シンポジウム 2015, 青葉サイエンスホール, 宮城県仙台市, 2015 年 12 月 9 日-11 日

篠田一也, 櫻井隆, 熊谷収可, 萩野正興, 森田諭, “乗鞍でのコロナグラフ試験観測”, 天文学に関する技術シンポジウム 2015, 青葉サイエンスホール, 宮城県仙台市, 2015 年 12 月 9 日-11 日

萩野正興, 一本潔, 木村剛一, 仲谷善一, 上野悟, 劉忠, 徐稚, 篠田一也, 原弘久, 末松芳法, 清水敏文, 北井礼三郎, “狭帯域チューナブルフィルターの開発と太陽彩層観測”, 天文学に関する技術シンポジウム 2015, 青葉サイエンスホール, 宮城県仙台市, 2015 年 12 月 9 日-11 日

M. Hagino, “Development of a universal tunable filter for future solar space and ground observations”, KASI/SOS seminar, 韓国天文研究院、韓国大田市, 2015年11月9日

M. Hagino, K. Ichimoto, S. Ueno, G. Kimura, R. Kitai, L. Zhong, Z. Xu, K. Otsuji, K. Shinoda, H. Hara, Y. Suematsu, and T. Shimizu, “Development of the Universal Tunable Filter and High-resolution Imaging Observation with the Fuxian Solar Observatory”, The 3rd Asia-Pacific Solar Physics Meeting, ソウル大学、韓国ソウル市, 2015年11月3日-6日

M. Hagino, K. Ichimoto, S. Ueno, G. Kimura, R. Kitai, L. Zhong, Z. Xu, K. Otsuji, K. Shinoda, H. Hara, Y. Suematsu, and T. Shimizu, “Development of the Universal Tunable Filter and High-resolution Imaging Observation with the Fuxian Solar Observatory”, Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era, コインブラ大学、ポルトガル・コインブラ, 2015年10月5日-9日

Hagino M., et al., “Development of the Universal Tunable Filter for future solar observations”, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, カナダ・モントリオール, 2015年6月22日-27日

萩野正興, “狭帯域チューナブル・フィルターを用いた太陽彩層観測”, 日本天文学会 2015年春季年会, 大阪大学, 大阪府豊中市, 2015年3月18日-21日

萩野正興, “狭帯域チューナブル・フィルターを用いた太陽彩層観測”, 太陽研連シンポジウム「サイクル24極大期の太陽活動と太陽研究の将来計画」, 名古屋大学, 愛知県名古屋市, 2015年2月16日

萩野正興, “Solar-C 搭載を目指す狭帯域チューナブル・フィルター”, 第15回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2015年1月6日-7日

萩野正興, “狭帯域チューナブルフィルターによる彩層イメージング分光観測”, 日本天文学会 2014年度秋季年会, 山形大学, 山形県山形市, 2014年9月11日-13日

萩野正興, “可視-近赤外狭帯域チューナブルフィルターの開発( )”, 太陽研連シンポジウム「活動極大期を迎えた太陽研究の新たな展開 - 彩走プラズマ診断、宇宙天気、Solar-C - 」, 京都大学, 京都府京都市, 2014年2月17日-19日

萩野正興, “SOLAR-C に搭載する狭帯域チューナブルフィルターの開発”, 宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2014年1月9日-10日

M. Hagino, K. Ichimoto, S. Ueno, G. Kimura, R. Kitai, L. Zhong, Z. Xu, K. Otsuji, K. Shinoda, H. Hara, Y. Suematsu, and T. Shimizu, “Development of the Universal Tunable Filter for future space and ground observations”, The seventh Hinode science meeting, 飛騨・世界生活文化センター, 岐阜県高山市, 2013年11月12日-15日

〔〔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://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/~hagino/FSO/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

萩野正興 (Masaaki Hagino)  
国立天文台・太陽観測所・専門研究職員  
研究者番号: 90437195