

京都大学大学院理学研究科附属天文台技報

Technical Reports from Astronomical Observatory

Graduate School of Science, Kyoto University

Vol. 4-1

狭帯域チューナブルフィルターUTF-32の

波長分解能向上を目的としたエレメントの開発

Development of a new element for improving the spectral

resolution of the narrow band tunable filter UTF-32

徳田 怜実^{*1}、木村 剛一^{*1}、大辻 賢一^{*1}、一本 潔^{*1}

2019年 4月 26日

¹京都大学理学研究科附属天文台

概要

太陽観測衛星「ひので」や大型地上望遠鏡の開発によって、高空間分解能の観測が可能となったことで、彩層中には幅 100km~200km 程の微細な筋状構造がいたるところに存在し、ダイナミックに運動していることが明らかになってきた。これらの現象の起源を理解するためには、2次元的に広がった微細構造を、高い空間分解能と時間分解能で観測することが必要であり、またスペクトル線プロファイルから視線方向の動きも含めた3次元方向の運動を知ることも重要である。こういった目的から、飛騨天文台では高速波長スキャン可能な狭帯域フィルター UTF-32 (Universal Tunable Filter, 口径 32mm) を製作し、多波長撮像観測を行ってきた。UTF-32 は、方解石、液晶可変遅延素子、1/2 波長板、直線偏光板を組み合わせたブロックを7段に重ねたフィルターである。5100Å~11000Å の広い波長域で使用可能であり、透過幅は H α 付近で 0.25Å である。今回我々は、UTF-32 の波長分解能向上を目的として、有効開口面積 40mm×40mm、総長約 92mm の方解石と2つの液晶可変遅延素子からなる新たなエレメントの開発を行った。このエレメントは、UTF-32 と組み合わせて用いることで全体としての透過幅を UTF-32 単体時の半分とするものである。これにより、スペクトル線の幅の狭い MgI 5172Å、CaII 8542Å、HeI 10830Å でも、H α 同様にコントラストの高い彩層画像の取得が可能となった。なお、フィルターの透過率はそれぞれ MgI 5172Å で 0.04、H α で 0.20、CaII 8542Å で 0.15、HeI 10830Å で 0.05 程度となった。

Abstract

High spatial resolution images from the Solar Optical Telescope aboard Hinode satellite and recent large ground-based solar telescopes have revealed that solar chromosphere is full of dynamic plasma motions of fine scale magnetic structures. To understand the origin of such phenomena and their role for the energy transport in the solar atmosphere, we need to observe their dynamics with a high spatial and temporal resolutions and wide field of view. In addition, we also need to get the information of three dimensional motions from the observations of chromospheric spectral lines. For these purposes, we developed a narrow-band tunable filter called UTF-32 (Universal Tunable Filter, the aperture size is 32mm). UTF-32 builds up with seven stages. Each stage consists of a pair of calcites, a Liquid Crystal Variable Retarder (LCVR), a wide band half-wave plates and a linear polarizer. UTF-32 covers a wide wavelength range (5100Å~11000Å), and its width of transmission is 0.25Å at H α . Now, we have developed a new element of UTF-32 consisting of 40mm×40mm×92mm calcite and

two LCVRs in order to make the filter transmission narrower. Using the new element with UTF-32, the width of the filter transmission becomes 0.125\AA at $H\alpha$, and, in addition to $H\alpha$, high contrast images at spectral lines such as MgI 5172\AA , CaII 8542\AA and HeI 10830\AA can be observed. The peak transmittance at MgI 5172\AA , $H\alpha$, CaII 8542\AA , and HeI 10830\AA are 0.04, 0.20, 0.15 and 0.05, respectively.

1 序論

太陽観測衛星「ひので」や大型地上望遠鏡の開発によって、高空間分解能の観測が可能となったことで、太陽の彩層中には幅 100km~200km 程の微細な筋状構造がいたるところに存在し、それらがダイナミックに運動していることが分かってきた。太陽彩層の微細構造の観測において、現象の物理量を詳しく測定するためには、2 次元的に広がった彩層の構造を、高い空間分解能と時間分解能で観測することが必要である。また、微細構造の複雑な運動を知るためには、平面方向と視線方向を合わせた 3 次元速度場の観測も重要となる。分光器を用いた分光観測で広い視野の観測を行うには、太陽面上でスリットを幅広く動かしてスキャンする必要があるが、これには非常に時間がかかるため、空間的に広がり、かつ短時間で変化する現象をとらえることは困難である。一方、撮像観測による単色像の観測では、広い視野での観測は可能であるが、スペクトル線プロファイルの取得が難しく、各物理量の定量的な解析が困難であることが多い。ここで威力を発揮するのが、波長スキャン可能な狭帯域フィルターによる多波長撮像観測である。この観測では、広視野にわたって高時間・高空間分解能を達成できる上に、観測波長をスキャンさせることでスペクトル線プロファイルの情報も得ることができる。

UTF-32 (Universal Tunable Filter, 口径 32mm) は、京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台が開発した狭帯域フィルターである (Hagino et al. 2014[1])。透過幅は $H\alpha$ 付近で 0.25\AA と狭帯域であり、波長方向に高速 (1 波長当たり 0.1 秒程度) でスキャンが可能である。また、このフィルターの出射側最後尾の直線偏光板を偏光ビームスプリッターに置き換えることにより、 $H\alpha$ 付近で互いに 1\AA 離れた 2 波長による太陽画像を同時に取得することが可能である。UTF-32 は現在は飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡水平分光器に取り付けられており、主に $H\alpha$ での彩層の観測に用いられているが、その名の Universal(汎波長域) が示すように、波長板として広い波長範囲で非常に一様な遅延量特性を実現したスーパーアクロマティック波長板を用いており、 $5000\text{\AA}\sim 11000\text{\AA}$ の幅広い波長域で使用することが可能である。

本論文では、UTF-32 の波長分解能向上を目的としたエレメントの開発について報告する。UTF-32 の現在の透過幅は $H\alpha$ で 0.25\AA であるが、この UTF-32 の透過幅をこれまでの半分にするために UTF-32 に取り付ける新たなフィルターである $1/8\text{\AA}$ ブロックの開発に取り組んだ。その作業の報告について述べる。2 章では従来の UTF-32 の原理及び性能について述べる。また UTF-32 の課題についても取り上げる。3 章では UTF-32 に取り付ける $1/8\text{\AA}$ ブロックの開発について述べる。4 章では UTF-32 に $1/8\text{\AA}$ ブロックを取り付

けたフィルター (UTF-32+) の試験観測結果と現時点での課題を紹介する。最後に 5 章にて今回の開発全体のまとめと結論を述べる。

2 狭帯域フィルター UTF-32 について

2.1 UTF-32 の原理

UTF-32 の模式図を図 1 に示す。UTF-32 は 7 段のブロックを直列に配置した層構造をしており、それぞれの段は、方解石、直線偏光板、液晶可変遅延素子 (Liquid Crystal Variable Retarder: LCVR)、 $1/2$ 波長板からなる。入り口側にはブロッキングフィルターを置き、UTF-32 の free spectral range ($H\alpha$ 近傍で 32\AA) に相当する波長帯以外の透過光をブロックしている。また出口側には直線偏光板の代わりに互いに直交する偏光成分の光を別々に取り出すことのできる偏光ビームスプリッターが取り付けられている。UTF-32 では、偏光ビームスプリッターによって最終的な出射光を直交 2 偏光に分けて、その先にそれぞれ取り付けられた 2 台のカメラで撮像を行うことができる。この意図は 2.2.2 で述べる。

図 2 左には、7 段のブロックそれぞれの透過光およびフィルター全体の透過光を示す。一番上が図 1 の一番右の段の透過光と対応しており、透過率の半値幅 (FWHM) は $H\alpha$ 付近でそれぞれ、 16\AA 、 8\AA 、 4\AA 、 2\AA 、 0.5\AA 、 0.25\AA 、 1\AA である。全ての段を合わせた透過光は図 2 左の最下段に示しており、 $H\alpha$ 付近での透過光の半値幅は 0.25\AA 、free spectral range は 32\AA である。赤と青の色の違いは偏光ビームスプリッターによって分けられる 2 つの光を表している。図 2 右は太陽の $H\alpha$ スペクトルとフィルターの透過幅との比較である。 $H\alpha$ のスペクトル線幅に対して UTF-32 の透過幅が十分狭いことがわかる。

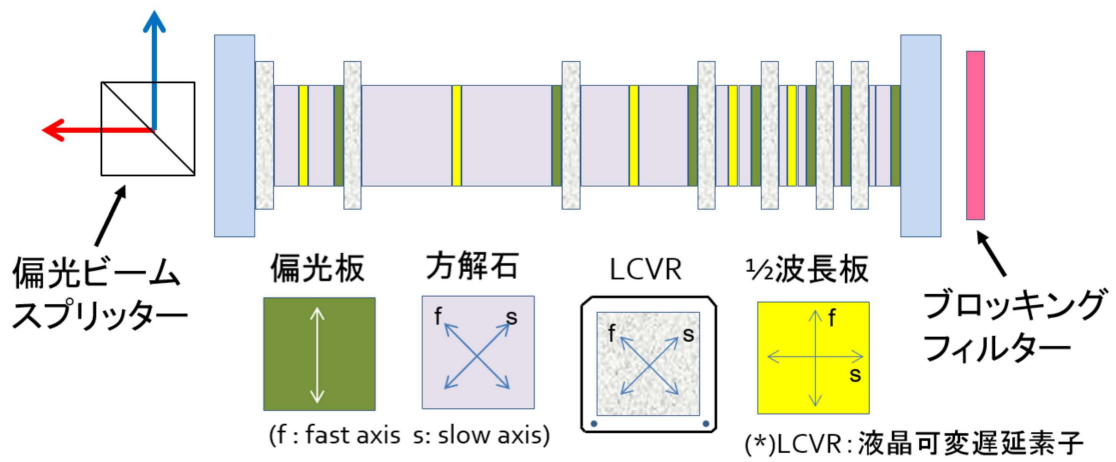


図1 UTF-32の模式図。UTF-32は7段のブロックからなる層構造をしており、それぞれの段は、方解石、直線偏光板、液晶可変遅延素子、1/2波長板からなる。

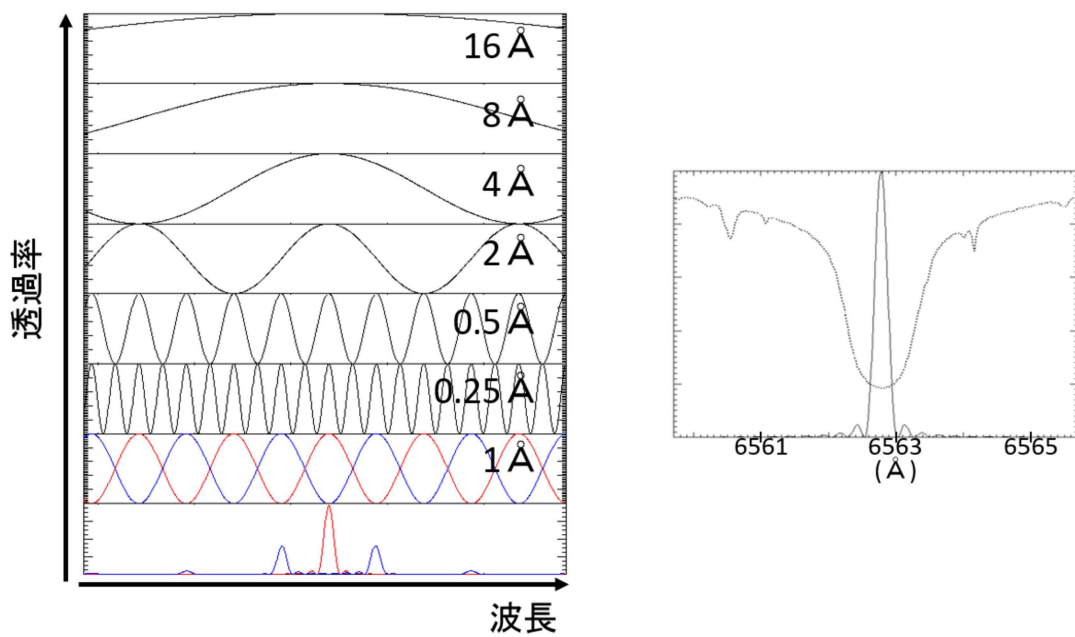


図2 左図: UTF-32の各段ごとの透過光と UTF-32 全体の透過光 (左図最下段)。右図: H α 付近での UTF-32 全体の透過プロファイルと太陽スペクトルと比較したもの。この波長での透過率の半値幅は 0.25Å である。

2.2 UTF-32 の特長

2.2.1 高速波長スキャン

従来のリオフィルターでは波長制御を行うため、偏光板などの光学素子を回転させるため、機械駆動部分とオイル槽が必要であった。一方、UTF-32 では波長制御のために液晶可変遅延素子 (LCVR) を用いている。LCVR は印加電圧を変化させることで遅延量を変化させることができる。図3は液晶の遅延量を45度としたときの、波長制御の原理について模式的に示したものである。この電圧制御による波長制御により、任意の波長に高速(0.1秒程度)でチューニングすることが可能になった。また機械駆動がなくなったことでオイル槽を排除することも可能となった。

2.2.2 2波長同時観測

図2から、 0.5\AA と 1\AA のブロックの液晶の電圧を変え、波長のピークをずらすと図4のようになる。図4に赤と青で示した、異なる波長帯の光($H\alpha$ の場合 $\pm 0.5\text{\AA}$)は、互いに直交する偏光状態にあり、UTF-32の出口に取り付けてある偏光ビームスピリッターによって、別々のカメラへと送られる。2台のカメラの露出タイミングを同期させることで、2つの異なる波長の画像を同時に撮像することができる。これは、ドップラー速度を求める際など差分画像を取るときに、シーイングによる像のゆがみが2波長で全く同じであるため、それに依存しない差分画像が得られるという点で大きなメリットである。

2.2.3 広波長域で使用可能

UTF-32に使われている液晶や偏光板等の素子は 5000\AA ~ 11000\AA の幅広い波長帯で使用可能(スーパーアクロマティック)であるものを用いている。そのため、適切なブロッキングフィルターを用いることにより、 5000\AA ~ 11000\AA の範囲内であればどのような波長でも使用可能である。

5000\AA ~ 11000\AA の波長域には代表的な彩層のスペクトルがいくつか存在する。例えば $H\alpha$ はスペクトルの幅が広く彩層の模様もよく見えるので歴史的にも良く使われてきた波長である。 $MgI\ 5172\text{\AA}$ は温度最低層(彩層下部)を観測できる。また $H\alpha$ より波長が短いために空間分解能が高くなるため、微細構造などの詳細な観測に適している。 $HeI\ 10830\text{\AA}$ では彩層上部が観測可能であり、また $CaII\ 8542\text{\AA}$ とともに磁場に感度があるため、偏光観測にも適した波長である。このようなスペクトルごとの特徴を生かした、多波長での撮像観測は、彩層構造のさらなる理解のためには重要である。

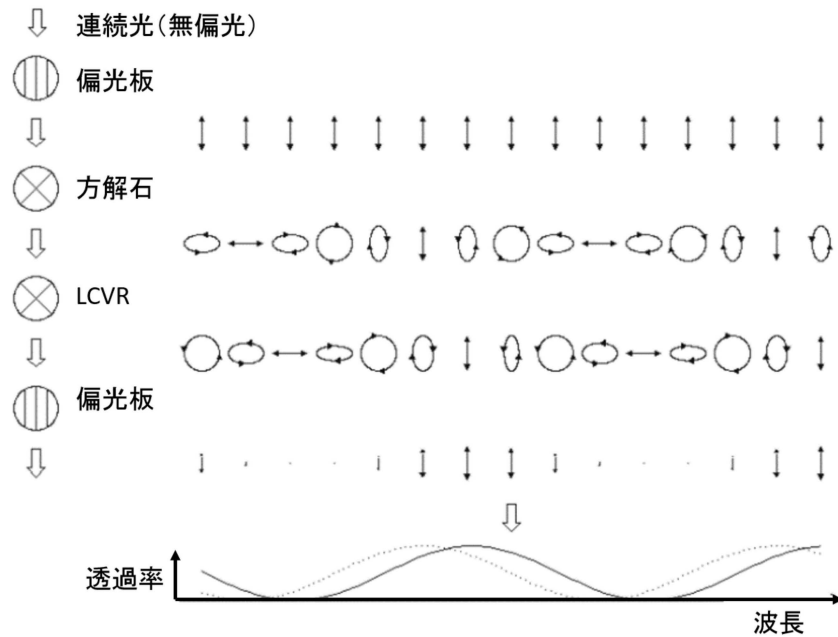


図3 LCVRを用いたリオフィルターの波長制御。LCVRの遅延量を45度とした場合。1/4波長板による波長制御と違い、機械駆動部分がないことが特徴である。

2.3 UTF-32の課題

UTF-32はこれまで、その長所を生かして、撮像分光観測や2波長同時観測を行ってきた。しかし、いずれの観測も主には $H\alpha$ での観測であり、他の波長での観測は行われてきていなかった。その理由としてUTF-32のフィルター透過幅があげられる。

代表的な彩層ラインのスペクトルにUTF-32の理論的な透過曲線を重ねたのが図5である。 $H\alpha$ 以外の彩層スペクトル線の幅は、UTF-32の透過幅と同等程度、あるいはより狭い。また、リオフィルターの透過幅は長波長になるほど、波長で規格化した透過幅が大きくなるという性質がある。その結果、 $H\alpha$ 線以外のいずれの彩層スペクトルにおいても、スペクトル線に対してUTF-32の透過幅が同等以上となることが課題としてあげられる。その結果、スペクトル線の観測時に連続光成分も混入してしまい彩層構造のコントラストが下がるため、現在のUTF-32の透過幅では $H\alpha$ 線以外での彩層の観測には不十分である。

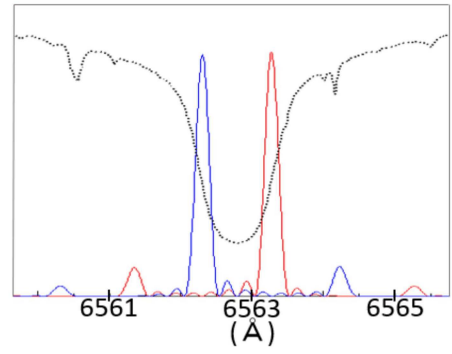
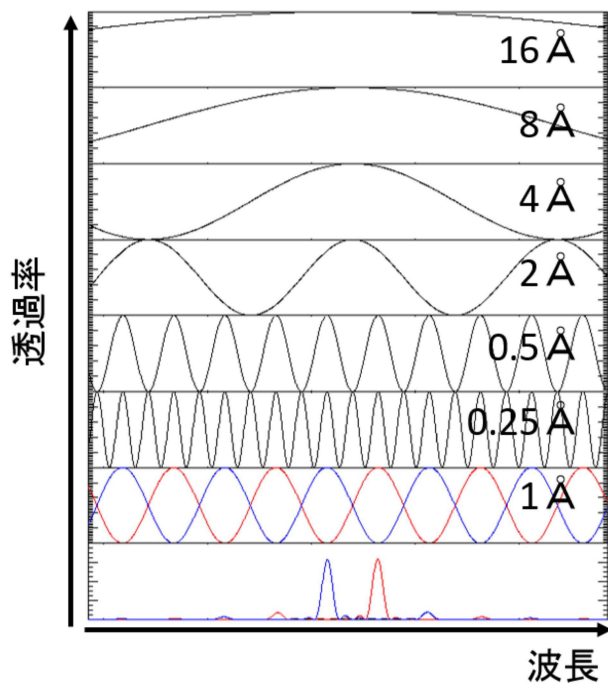


図4 UTF-32の各段ごとの透過波長とフィルター全体の透過光。右図： $H\alpha$ 付近での透過光を太陽スペクトルと比較したもの。この波長では $\pm 0.5\text{\AA}$ の同時撮像が可能である。

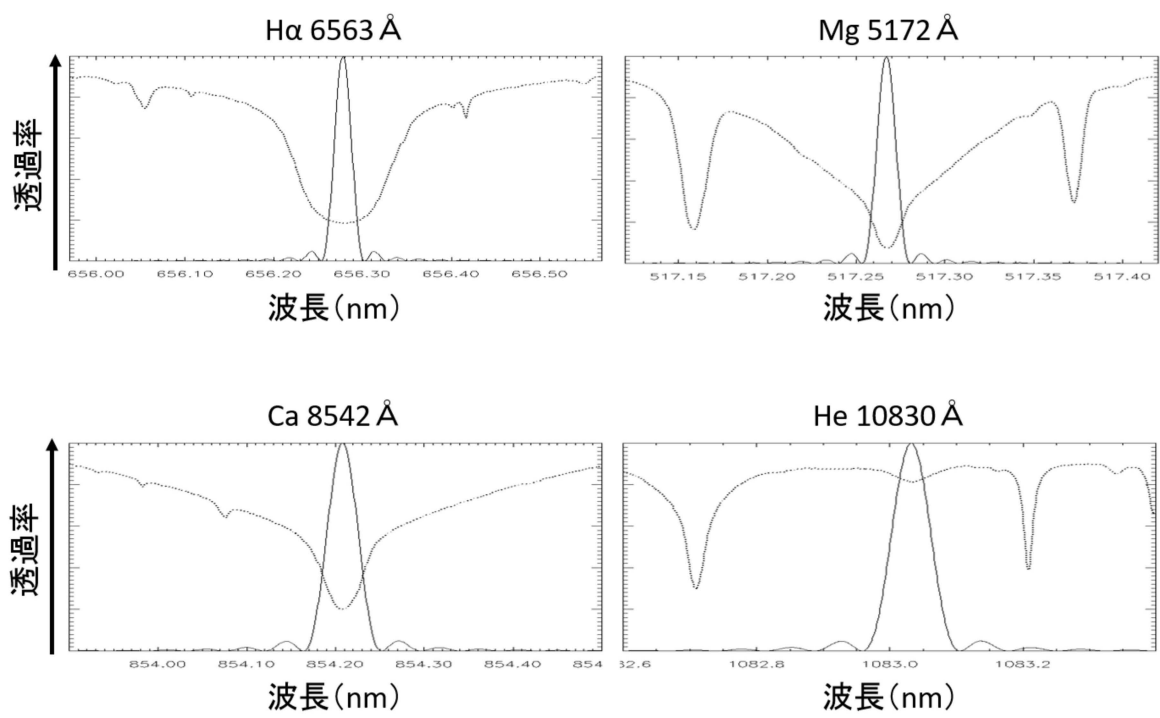


図5 代表的な彩層スペクトルと UTF-32 の透過幅の比較

3 UTF-32 に取り付ける 1/8Å ブロックの開発

3.1 1/8Å ブロック開発の目的

2.3 章で述べたように、UTF-32 の透過幅は、 $H\alpha$ 付近で 0.25\AA であり、これは MgI 5172\AA 、 $CaII$ 8542\AA 、 HeI 10830\AA などのスペクトル線に対しては太く、このスペクトル線での彩層観測、磁場観測には不十分である。この課題を解決するために、UTF-32 の最長の方解石 (約 46mm) の倍の分厚さの方解石を持つブロックを新たに製作し、これを UTF-32 と合わせることで、透過幅を半分の 0.125\AA ($H\alpha$ 付近) のフィルターを開発することが本開発の目的である。これにより、より幅の狭いスペクトル線において波長分解した観測ができることが期待される。

以降、付け加えるフィルターのことを $1/8\text{\AA}$ ブロックと呼び、UTF-32 と $1/8\text{\AA}$ ブロックを組み合わせたものを UTF-32+ (プラス) と呼ぶこととする。

3.2 1/8Å ブロックの仕組み

$1/8\text{\AA}$ ブロックの模式図を図 6 に示す。これは UTF-32 の手前に取りつけ、一緒に用いる。 $1/8\text{\AA}$ ブロックは UTF-32 とは別で単独でケースにおさめ、温度制御も単独で行う。出口の偏光板は $1/8$ ブロック単独での試験の時には取り付けるが、UTF-32 と組み合わせるときは取り外し、UTF-32 の入り口の偏光板がその役割をする。

$1/8\text{\AA}$ ブロックの原理は UTF-32 と同様である。大きな違いは、これまで $1/2$ 波長板を用

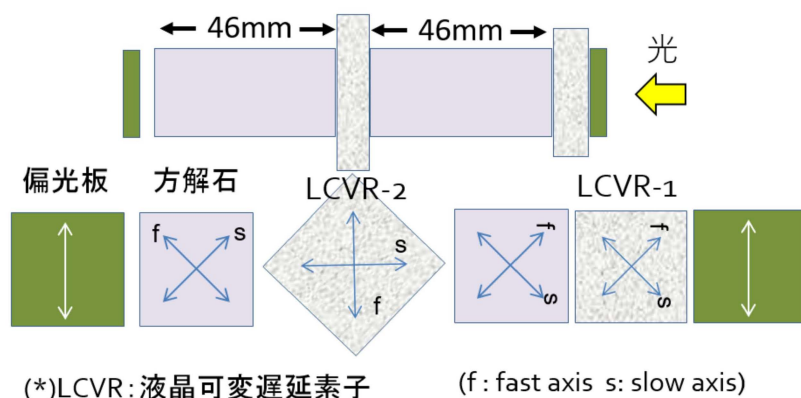


図 6 UTF-32 $1/8\text{\AA}$ ブロックの模式図

いていたところに、代わりに液晶可変遅延素子 (LCVR) (図 6 の LCVR-2) を用いているところである。LCVR は印加電圧を変えることで遅延量を変化させることができる。図 6 の LCVR-1 はこれまで同様、波長チューニング用の液晶であり、遅延量に応じて透過波長のピークが波長方向にシフトする。LCVR-2 は、遅延量を $(N + 1/2)\lambda$ ($N = 0, 1, 2, \dots$) にすると、 $1/2$ 波長板と同様の働きをするため、透過波長の半値幅が $1/8\text{\AA}$ ($H\alpha$ 付近) となる。一方で、LCVR-2 の遅延量を $N\lambda$ ($N = 0, 1, 2, \dots$) とすると、軸の向きを 90 度ずらして置いている 2 つの方解石中で生じた遅延量がキャンセルされ、 $1/8\text{\AA}$ ブロックは機能しなくなる。つまり、LCVR-2 は $1/8\text{\AA}$ ブロックの on/off 切り替え用の液晶であると言える。 $1/8\text{\AA}$ ブロックを off にすると、UTF-32+ の $1/8\text{\AA}$ ブロックの効果はキャンセルされるために、透過幅が UTF-32 と同じ 0.25\AA となる。 $H\alpha$ での観測の際など、透過幅が従来のもので十分であるときには光量を上げるために off にして用いる。

また、 $1/8\text{\AA}$ ブロックに使用する方解石は分厚いため、約 23mm の厚さを持つ方解石を 4 つ使用することで、半値幅が $1/8\text{\AA}$ ($H\alpha 6563\text{\AA}$ 付近) を達成するのに必要な方解石の厚み (約 92mm) を実現している。

3.3 $1/8\text{\AA}$ ブロックの構造及び製作

$1/8\text{\AA}$ ブロックに用いた部品については表 1 にまとめた。図 7 左は $1/8$ ブロックの製作に用いられた各種光学素子である。これらの光学素子は異なった寸法で加工されており、また機械的に脆弱な方解石もあるため、このまま積層し張り合わせることはほぼ不可能である。そのため、各種光学素子ごとにアルミ材で切削加工した素子ホルダを製作し、その素子ホルダに光学素子をシリコン接着剤で接着した。素子ホルダには 4 個のスルーホールが開けられており、前面フランジに取り付けられているステンレスロッドを通すことによって各種光学素子を正確に配列することが可能となっている。光学素子の配列については図 8 に示した。各種光学素子の接合面はシリコンオイルで張り合わせているが、これは屈折率の不連続をなくすことで内部反射を防ぐためである。また、4 つある方解石の 1 つには、温度センサー (サーミスタ) を取り付けることで、方解石の温度を測定できるようになっている (図 7 右)。光学素子の積層が完了したのち、内筒を取り付けその外周にシリコンコードヒーターを巻きつけ伝導性シリコンで接着し、外周を断熱材で覆い外筒を取り付け後面フランジ取り付け完成とした (図 9)。

表 1 1/8Å ブロックに用いた部品

	製造元・製品	仕様
直線偏光板	Thorlab 社 LPNIREE2X2	50.8mm × 50.8mm
方解石	南京光学技術研究所	40mm × 40mm × 23mm, 4 個
LCVR	Meadowlark 社 ネマティック液晶	有効面積 40mm × 40mm
窓ガラス	シグマ光機 片面多層反射防止コート	φ=60mm, t=10mm
液晶コントローラー (UTF-32 用)	Meadowlark 社 D3050	4ch, 2.0kHz, 2 台
液晶コントローラー (1/8Å ブロック用)	ARCOptics 社 USB LC driver	2ch, 1.6kHz
筐体 & 素子ホルダー	京都大学理学研究科 研究機器開発支援室	材質：アルミニウム
ヒーター	シリコンコードヒーター	40W
温度センサー	日機装サーモ 44036	
温度コントローラー	オムロン温調器 ESCC-QX2ASM	
温度素子接着剤	信越シリコーン 伝熱性シリコン接着剤 KE-3467	
素子張り合わせオイル	東レダウコーニング シリコンオイル SH200	粘度：100,000 CS
素子接着材	ダウコーニング シリコンシーラント 6-1104	揮発物質コントロールシーラント

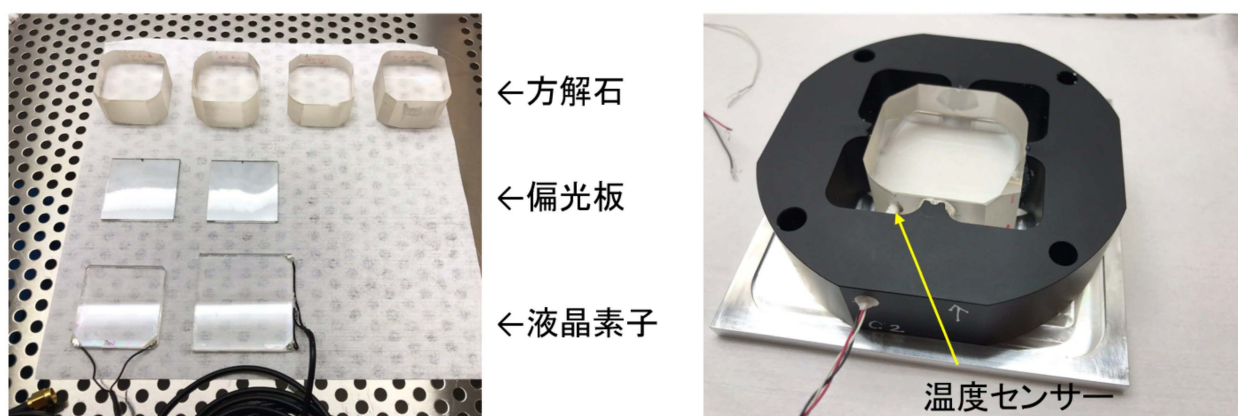


図 7 左は 1/8Å ブロックに用いた光学部品。右は素子ホルダと素子。

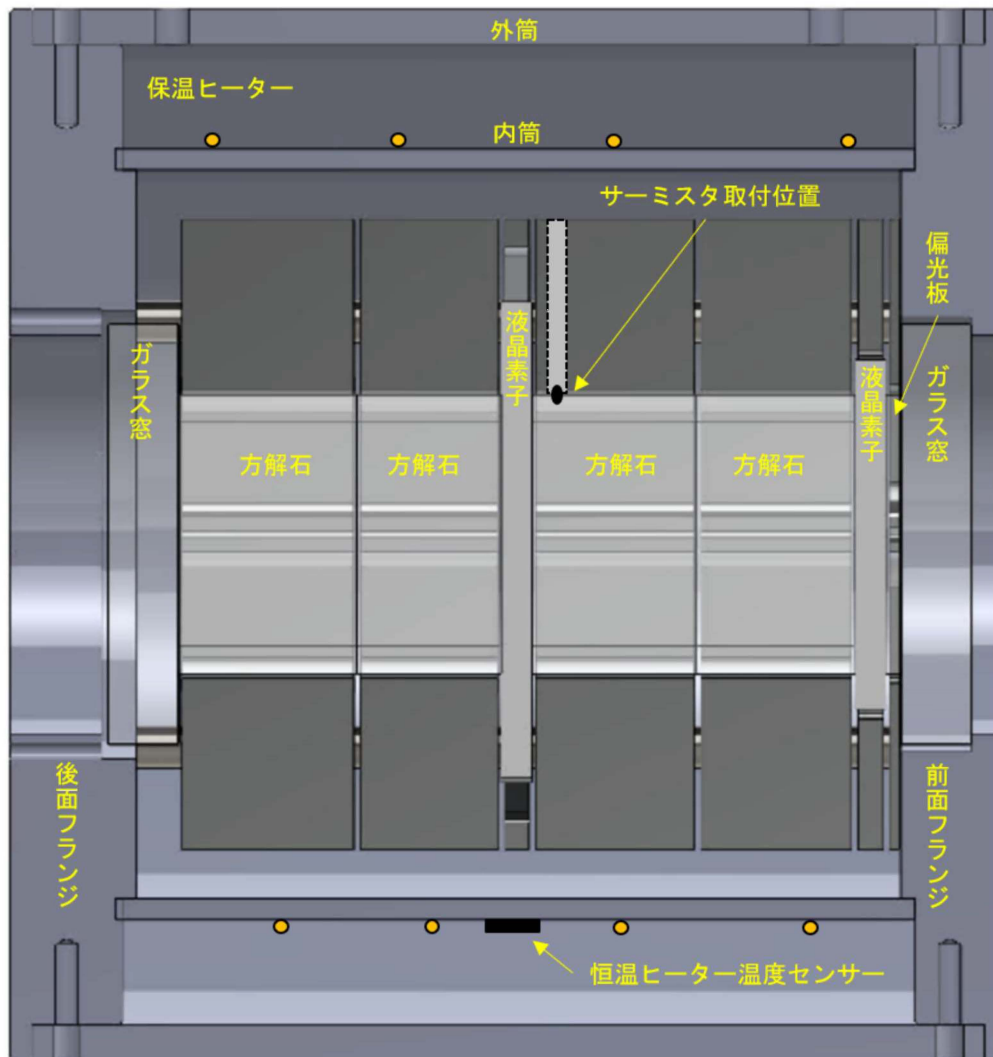
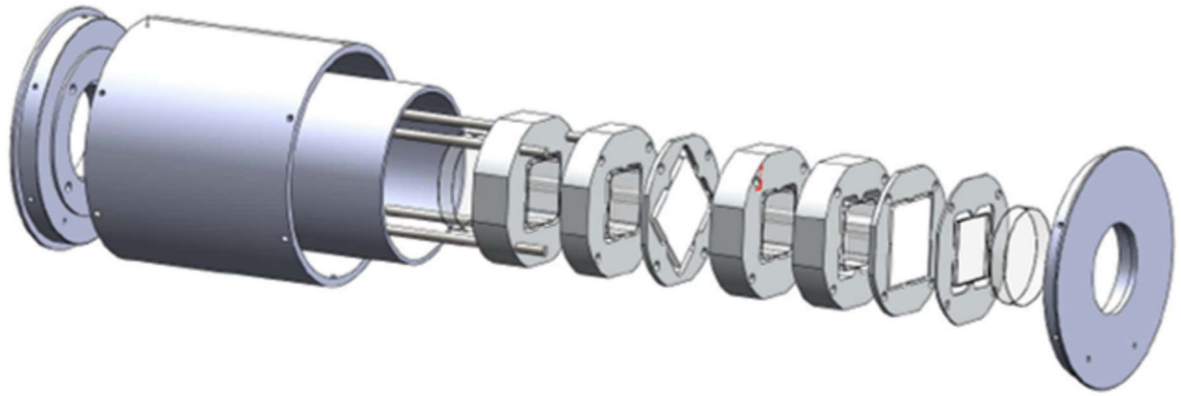


図8 上は $1/8\text{\AA}$ ブロックの分解図。下は断面図。

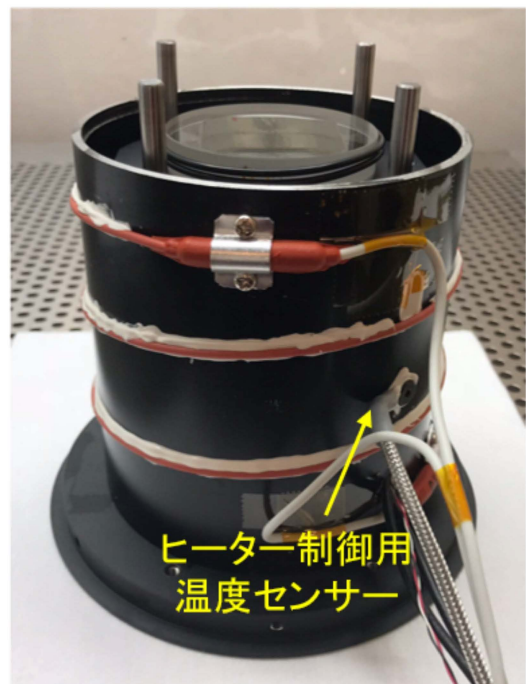
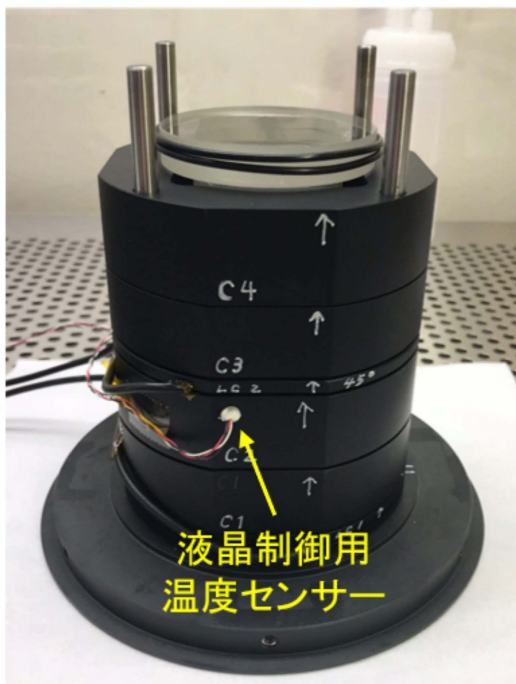


図9 左は素子積層状態。右は内筒に恒温ヒーターを取り付けた状態。内筒と外筒との間にある隙間はフェルトで断熱している。

3.4 制御パラメータの導出

3.4.1 液晶への印加電圧と遅延量の関係の導出

LCVR は、その温度や波長によって遅延量の電圧依存性が異なる。その関係は以下式のようにモデル化される (Hagino et al. 2014[1])。まず、電圧 V の逆数が遅延量 δ の 3 次式で表されると仮定する。

$$\frac{1}{V} = a_0 + a_1\delta + a_2\delta^2 + a_3\delta^3$$

係数 a_k は波長 λ の 3 次式で表されるとすると、

$$a_k = b_{k0} + b_{k1}\lambda + b_{k2}\lambda^2 + b_{k3}\lambda^3$$

と書ける。この b_{kj} は温度 T の 2 次式で表されるとすると、

$$b_{kj} = c_{kj0} + c_{kj1}T + c_{kj2}T^2$$

と書ける。係数 c_{kji} は実験値のフィッティングより求める。

このモデル式の係数を算出するために実験を行った。実験は、LCVR の温度を一定 (20 °C、30 °C、40 °C) に保ちつつ、加える電圧を変化させたときの遅延量の変化を分光器で測定するというものである。遅延量の測定には Mueller Matrix Spectro-Polarimeter (MMSP, Ichimoto et al. 2006[2]) を用いた。

図 10 はそのうち温度 20 °C で行った実験の結果である。図 10 左は、4 つの彩層ラインの波長における印加電圧と遅延量の関係を示したものである。図 10 右は、500nm~1100nm の波長域において、電圧を変化させたときの遅延量の変化をコンターで示したものである。実際の観測では、この実験によって求めたフィッティング係数 c_{kji} より、観測波長、観測中の温度から、LCVR への印加電圧を決め、フィルターの遅延量を制御している。

3.4.2 1/8Å ブロック on/off 時の電圧の決定

1/8Å ブロック on/off 時に LCVR-2 に印加する電圧、および 1/8Å ブロック off 時に LCVR-1 に印加する電圧を各観測波長ごとに決定させる必要がある。そのために、1/8Å ブロックに用いた 2 つの LCVR への印加電圧を変化させたときの、1/8Å ブロック全体の透過光の変化を確認する実験を行った。この実験は、人工光源 (He のみ太陽光) を 1/8Å ブロックに入射させ、2 つの液晶の印加電圧を変化させたときの透過光スペクトルを飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡水平分光器を用いて測定するというものである。

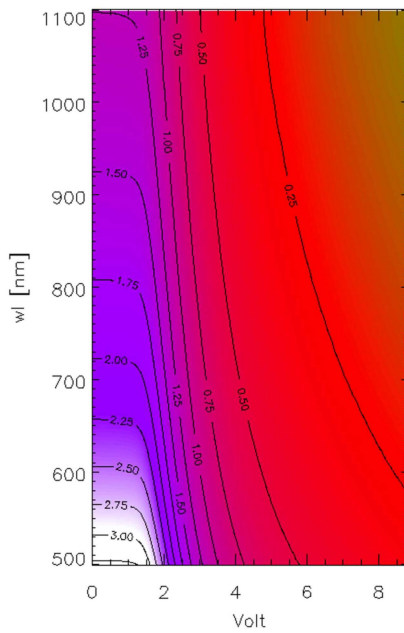
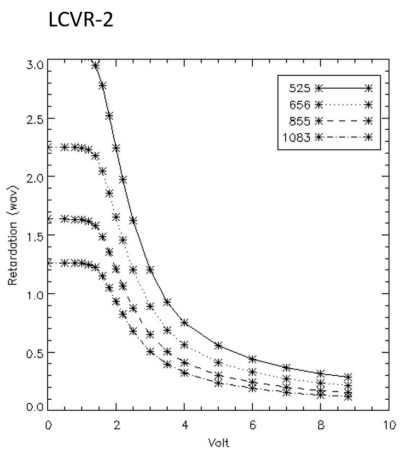
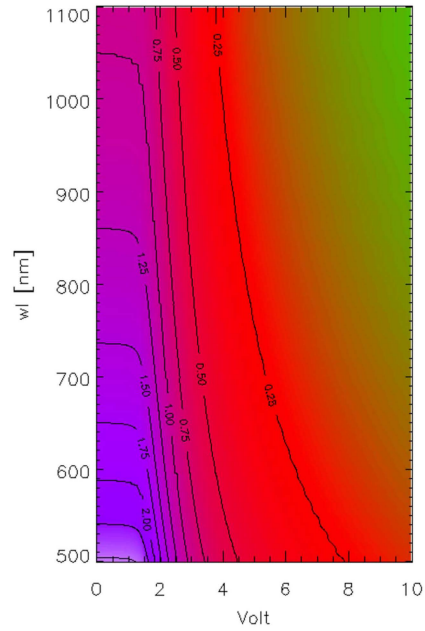
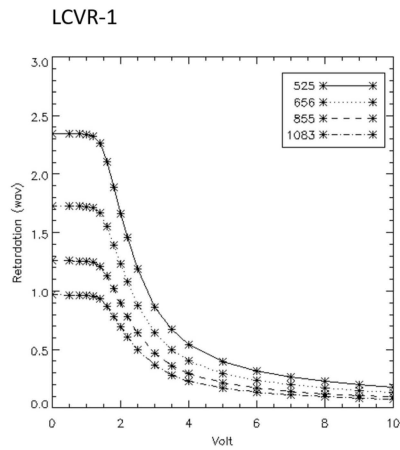


図 10 MMSP を用いた LCVR の評価試験の結果。左：ある波長における印加電圧と液晶遅延量の関係。右：印加電圧に対する液晶遅延量の変化の波長依存性

図 11 は $H\alpha$ 付近の波長で行った実験の結果である。図 11(a) は、LCVR-1 の電圧を一定 (3V) に固定し、LCVR-2 の電圧を変化させた時の様子である。電圧を変えることで波長方向に対する光の強度振幅が変化していることが見て取れる。図 11(b) では、(a) の結果を横軸電圧、縦軸強度振幅をとってプロットしたものである。電圧が 2.10V または 4.20V で振幅が最大となり、1.80V または 2.70V 付近で振幅が最小となっていることがわかる。振幅が最大の時は、LCVR-2 の遅延量が $1/2\lambda$ となり、 $1/2$ 波長板と同様にふるまっており、振幅が最小の時は、LCVR-2 の遅延量が 0 となり、このブロックの機能がキャンセルされていることを表している。この結果より、 $1/8\text{\AA}$ ブロックを on の場合は 4.20V、off の場合は 2.70V の電圧を LCVR-2 に印加することとする。

図 11 中段は、LCVR-2 の電圧を固定 (4.20V) し、LCVR-1 の電圧を変化させた時の様子である。 $1/8\text{\AA}$ ブロックを ON にした際、LCVR-1 の電圧を変化させることで透過プロファイルが波長方向に移動することが分かる。この波長のシフト量の電圧依存性は、3.4.1 章で実験的に求めたモデルをもとに制御する。

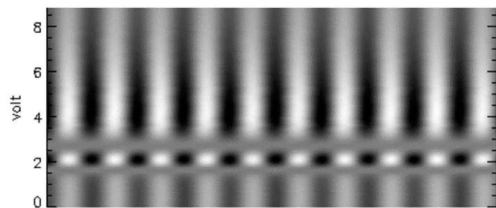
図 11 下段は LCVR-2 の電圧を固定 (2.70V) し、LCVR-1 の電圧を変化させた時の様子である。 $1/8\text{\AA}$ ブロックを off にする際は、このブロックの透過率を最大にしたい。この実験より、2.6V の時透過率が最大となる。この実験によって求めた電圧は、今後の観測において、 $1/8\text{\AA}$ ブロックの制御に用いる。

なお、同様の実験を $MgI\ 5172\text{\AA}$ 、 $CaII\ 8542\text{\AA}$ 、 $HeI\ 10830\text{\AA}$ でも行った。その結果をそれぞれ図 12、図 13、図 14 に示す。なお、実験に用いていた人工光の強度が $HeI\ 10830\text{\AA}$ では弱かったため、この波長のみ、人工光ではなく太陽光を用いて測定した。この実験の結果は表 2 にまとめた。なお、 $MgI\ 5172\text{\AA}$ での $1/8\text{\AA}$ ブロック off 時の LCVR-1 の電圧に関しては、図 12(e) に示すように、LCVR-1 に印加する電圧を変化させたときの透過率のピークが明確でなかったため暫定的に 7.00V に設定した。

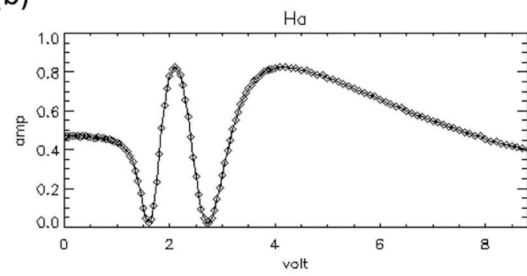
表 2 $1/8\text{\AA}$ ブロック on/off 時に各液晶へ印加する電圧値

	on (LCVR-1)	on (LCVR-2)	off (LCVR-1)	off (LCVR-2)
$H\alpha$	適宜	4.20V	2.75V	2.70V
$MgI\ 5172\text{\AA}$	適宜	5.40V	(7.00V)	3.30V
$CaII\ 8542\text{\AA}$	適宜	3.40V	3.15V	2.25V
$HeI\ 10830\text{\AA}$	適宜	2.90V	2.00V	1.80V

(a) LCVR-1 : 3.00V , LCVR-2 : scan(0V~8.8V)



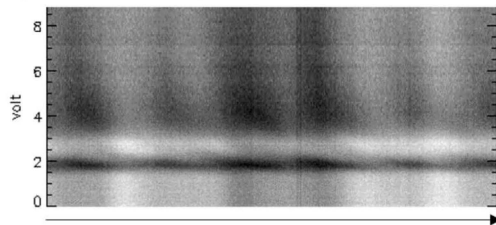
(b)



(c) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 4.20V



(d) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 2.70V



波長(H α 付近)

(e)

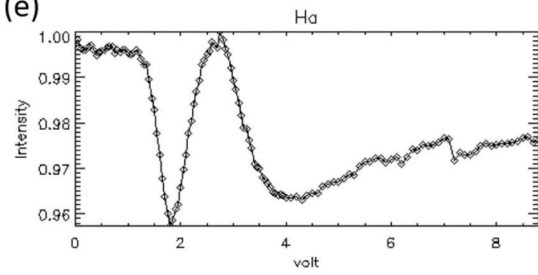
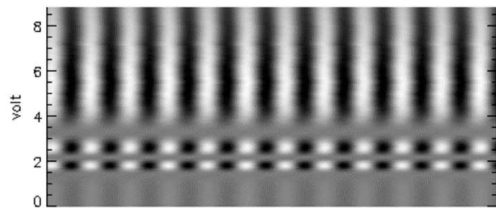
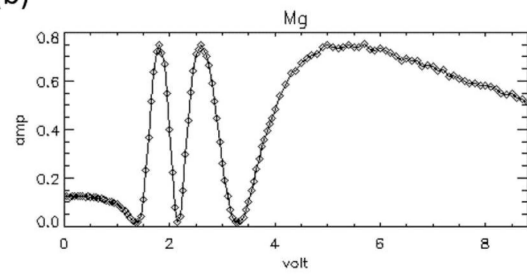


図 11 液晶に電圧を印加したときの遅延量の変化 (H α)

(a) LCVR-1 : 3.00V , LCVR-2 : scan(0V~8.8V)



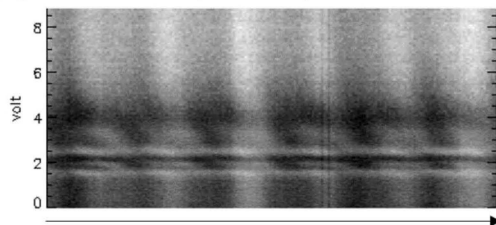
(b)



(c) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 5.40V



(d) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 3.30V



波長 (Mg付近)

(e)

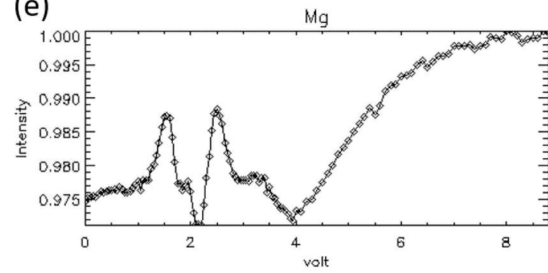
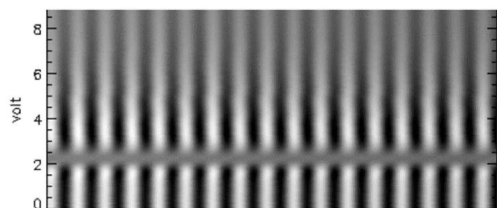
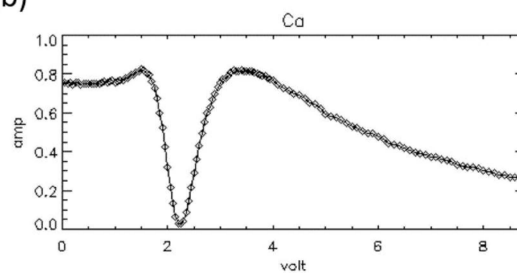


図 12 液晶に電圧を印加したときの遅延量の変化 (Mg)

(a) LCVR-1 : 3.00V , LCVR-2 : scan(0V~8.8V)



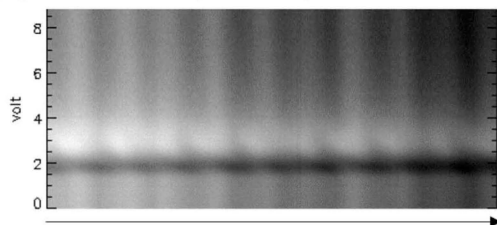
(b)



(c) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 3.40V



(d) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 2.25V



波長(Ca付近)

(e)

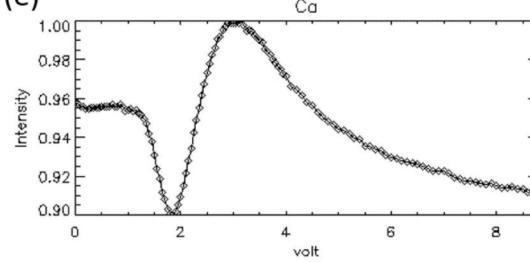
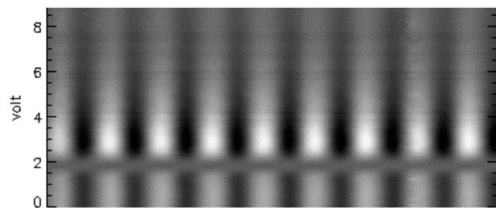
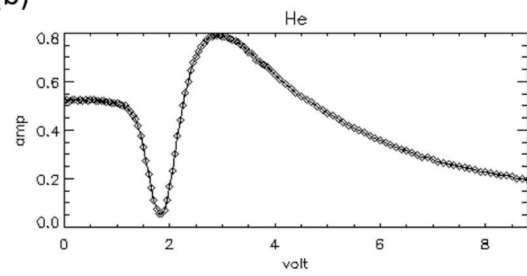


図 13 液晶に電圧を印加したときの遅延量の変化 (Ca)

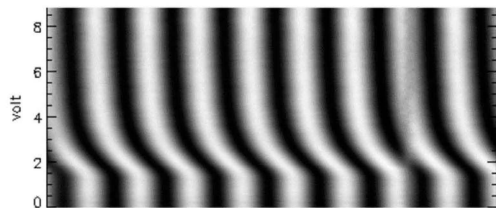
(a) LCVR-1 : 3.00V , LCVR-2 : scan(0V~8.8V)



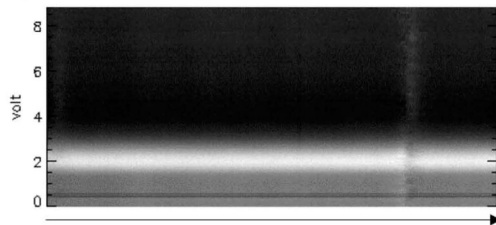
(b)



(c) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 2.90V



(d) LCVR-1: scan(0V~8.8V) , LCVR-2: 1.80V



(e)

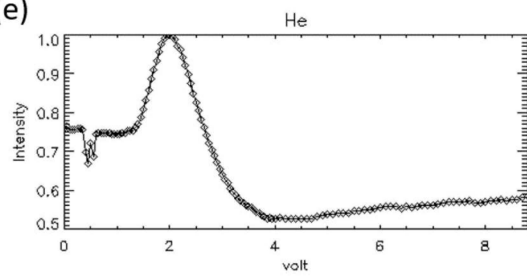


図 14 液晶に電圧を印加したときの遅延量の変化 (He)

3.5 制御

UTF-32+ 制御システムを図 15 に示す。UTF-32 に用いている 7つの液晶は Meadowlark 社製の液晶コントローラ（4ch × 2 個）によって制御を行っている。1/8Å ブロックでは、LCVR-1（波長チューニング用の液晶）は Meadowlark 社製の液晶コントローラを用い、LCVR-2（1/8Å ブロックの on/off 切り替え用の液晶）は ARCOptics 社製の液晶コントローラ（2ch）を用いている。各液晶の応答時間は 0.1 秒以下である。

フィルター内の温度は、中筒に取り付けられた温度センサーとヒーターを用いて、温度コントローラ（オムロン温調器）によって PID 制御され、30 度に保持される。光学素子の温度は、方解石の側面に取り付けられた温度センサーによって取得され、液晶電圧の制御に用いられる。

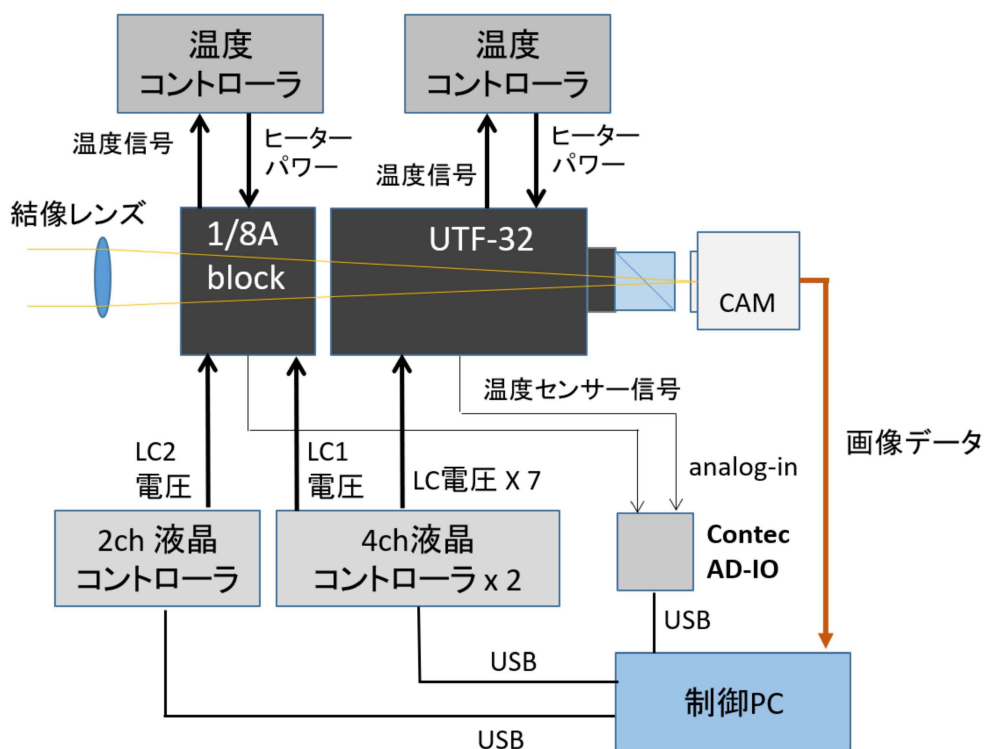


図 15 UTF-32+ 観測システム

4 試験観測

4.1 UTF-32+ の透過プロファイルの確認

飛騨天文台ドームレス望遠鏡の水平分光器に UTF-32 と $1/8\text{\AA}$ ブロックを取り付け、 $H\alpha$ 、 $MgI\ 5172\text{\AA}$ 、 $CaII\ 8542\text{\AA}$ 、 $HeI\ 10830\text{\AA}$ それぞれの波長において、透過率のピークが波長中心に揃うよう、各ブロックの電圧を調整した。図 16 は調整後に得られた透過プロファイルを示したものである。横軸は波長中心を 0\AA としたときの波長で、縦軸は UTF-32+（または UTF-32）とブロッキングフィルターを合わせた透過率である。黒が UTF-32 で赤が UTF-32+ の透過プロファイルである。UTF-32 に比べて UTF-32+ では、透過曲線がシャープになり、透過幅が半分になったことが確認され、 $1/8\text{\AA}$ ブロックが期待通りに機能していることがわかった。また、無偏光を入射させたとき、UTF-32+ とブロッキングフィルターを合わせた透過率は、 $H\alpha$ が 0.20、 $MgI\ 5172\text{\AA}$ が 0.04、 $CaII\ 8542\text{\AA}$ が 0.15、 $HeI\ 10830\text{\AA}$ が 0.05 程度であった。

4.2 撮像観測

実際に太陽光をフィルターに通して撮像観測を行った。図 18～図 21 はそれぞれ $H\alpha$ 、 $MgI\ 5172\text{\AA}$ 、 $CaII\ 8542\text{\AA}$ 、 $HeI\ 10830\text{\AA}$ の波長付近（波長中心、 $\pm 0.25\text{\AA}$ 、 $+ 2.00\text{\AA}$ ）での太陽像の様子と、 -2.00\AA （ HeI のみ -4.00\AA ）～ $+ 2.00\text{\AA}$ まで 0.05\AA 刻みで波長スキャンすることで得られたスペクトルである。波長中心付近で彩層の様子が観測され、また、スキャンすることで太陽スペクトルを再現できていることが確認された。これにより、これまで行っていた UTF-32 を用いた $H\alpha$ の観測と同様の観測が、 $MgI\ 5172\text{\AA}$ や $CaII\ 8542\text{\AA}$ 、 $HeI\ 10830\text{\AA}$ の波長帯でも可能であることが確認された。

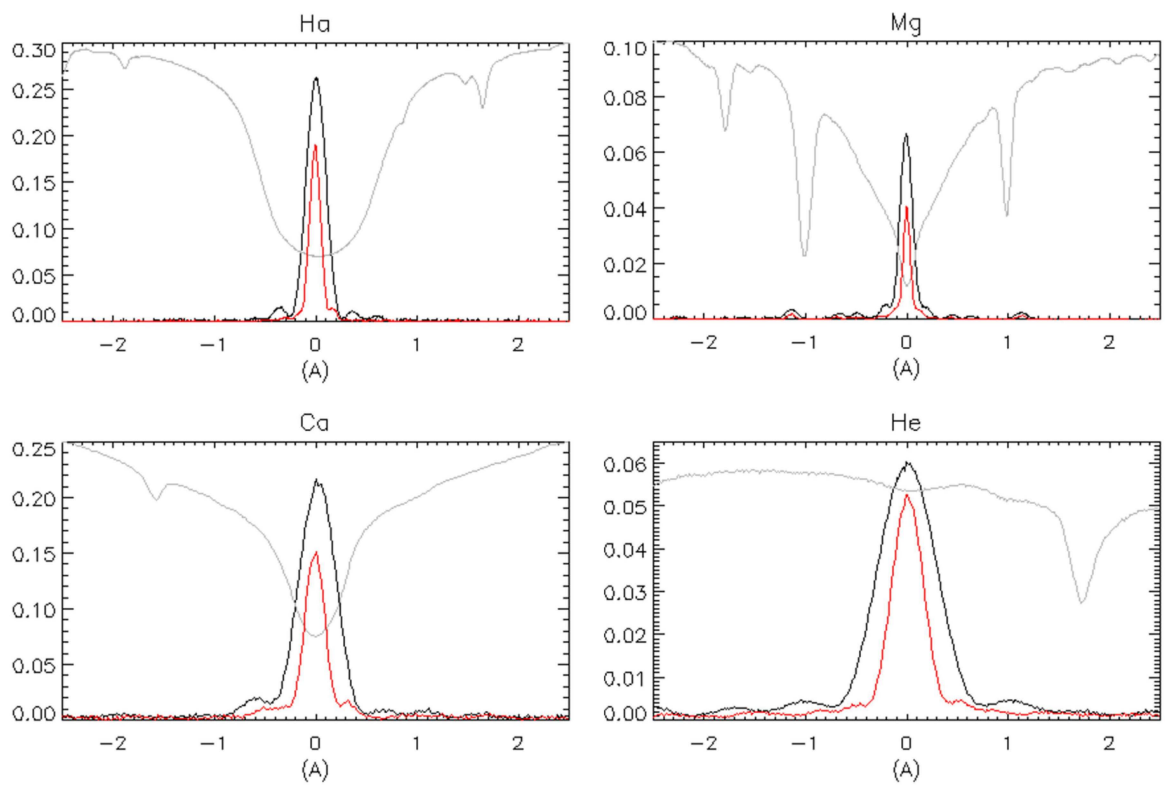


図 16 UTF-32 (黒) と UTF-32 + (赤) の透過プロファイルの比較。横軸は波長でそれぞれのスペクトル線の中心波長を 0 としている。太陽スペクトルに重ねて表示している。



図 17 観測の様子

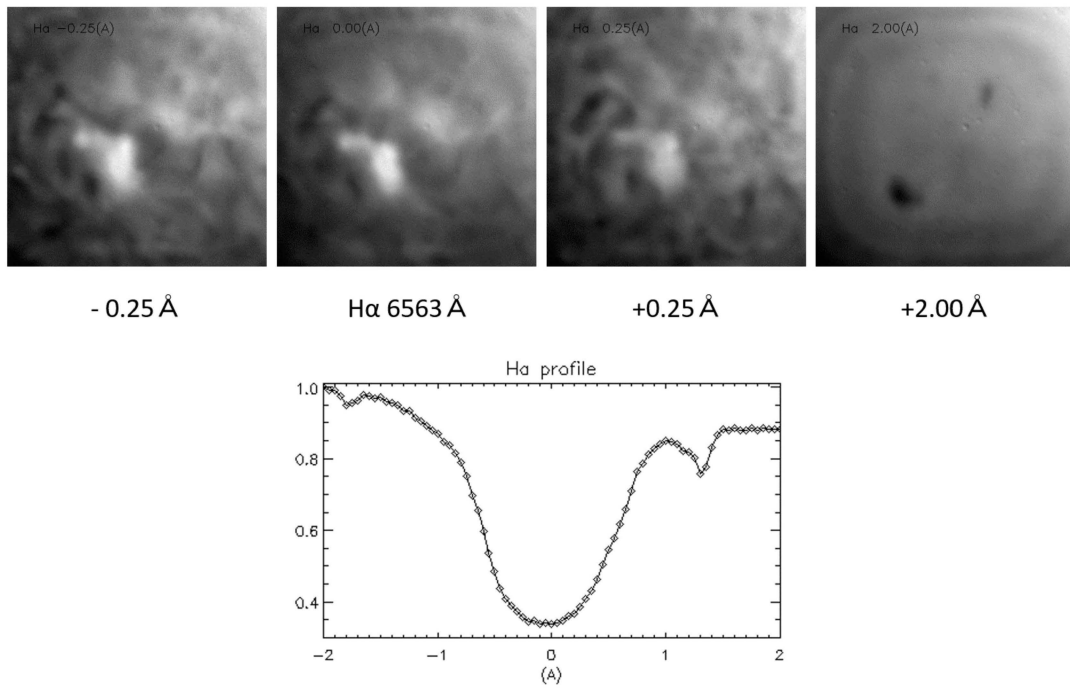


図 18 H α 近傍波長スキャンの様子と、スキャンすることによって得られたスペクトル

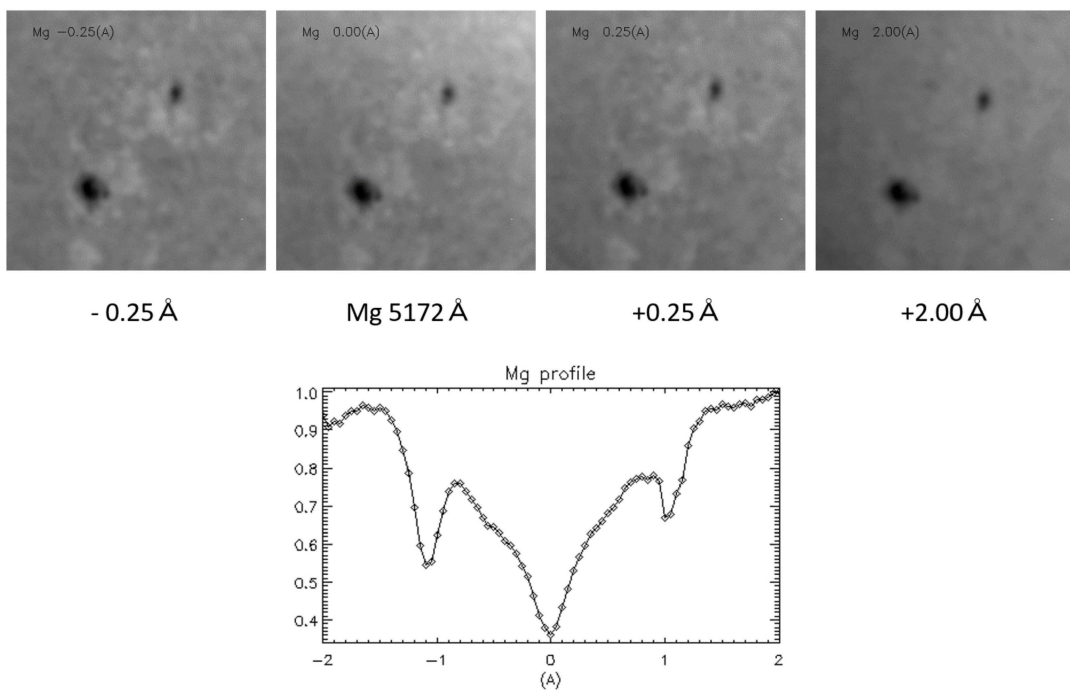


図 19 Mg 近傍波長スキャンの様子と、スキャンすることによって得られたスペクトル

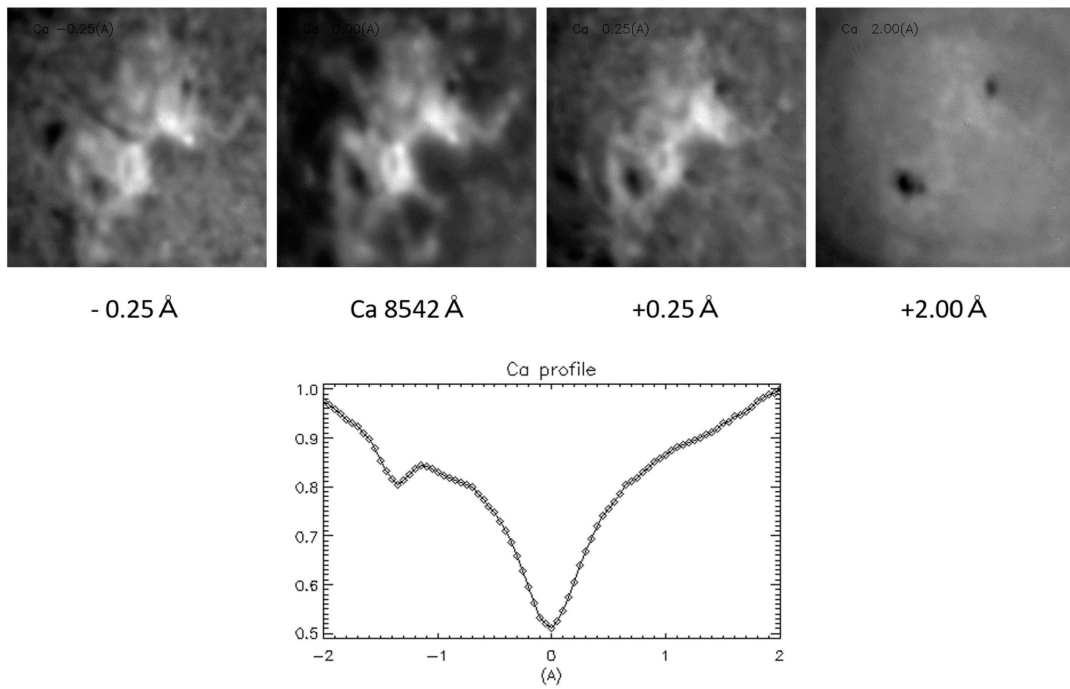


図 20 Ca 近傍波長スキャンの様子と、スキャンすることによって得られたスペクトル

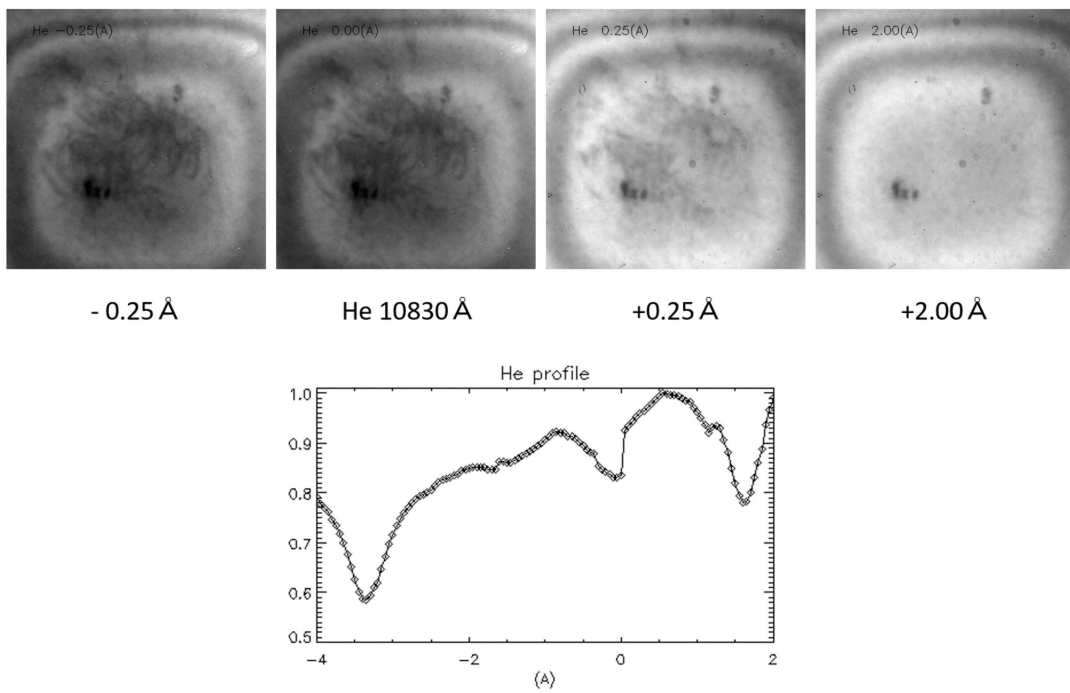


図 21 He 近傍波長スキャンの様子と、スキャンすることによって得られたスペクトル

4.3 UTF-32+ の課題

4.3.1 1/8Å ブロックの on/off 機能に関して

UTF-32+ の 1/8Å ブロックには on/off 機能を取り付けた。これは、H α での観測の際など、透過幅が従来のもので十分であるときには光量を上げるために 1/8Å ブロックの機能をキャンセルし、透過率の高いフィルターとして用いることができるようにするためである。しかし、1/8Å ブロックを off にした時、焦点が合わないことが確認された。図 22 はその様子を示したものである。この現象が発生する原因の一つとして、使用時の光束を考えている。現在このフィルターは収束光中に取り付けているため、フィルターへ入射する光の入射角度が大きい。フィルターに平行光を入射させたときと比較することによって原因が特定できるのではと考えている。なお、現段階では、UTF-32 と 1/8Å ブロックは別々であるため 1/8Å ブロックの off 機能を使わず、1/8Å ブロックを取り外して UTF-32 単体で観測を行うことができるため支障はない。

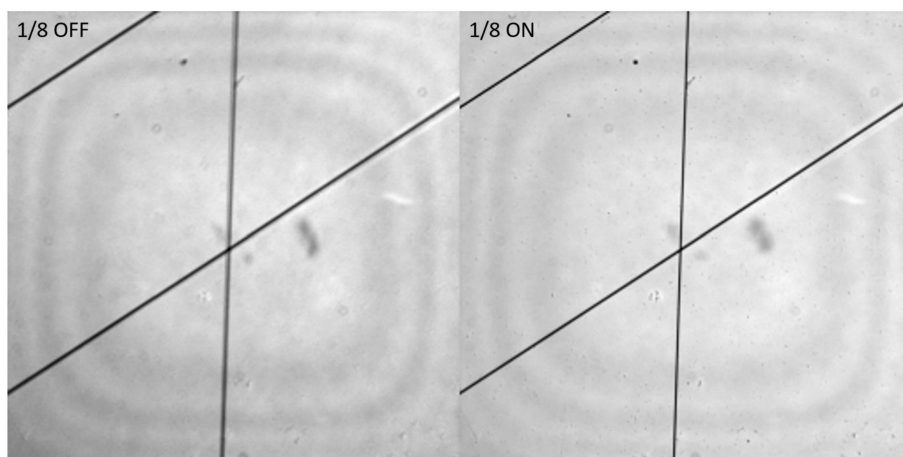


図 22 1/8Å ブロックが on の時と off の時での取得画像。1/8Å ブロックが on の状態で焦点を調整した（右）のちに同じ位置で 1/8Å ブロックが off とするとぼける（左）

4.3.2 温度制御に関して

UTF-32+ の透過プロファイルの測定中に、それが時間ともに崩れることがしばしば見受けられた。その原因は 1/8Å ブロックの温度制御にあると考えている。

方解石は、屈折率が温度に大きく依存するため、温度が変わればフィルターの波長特性も変わってしまう。透過幅 0.5Å を実現する厚みの方解石 ($d=0.26\text{mm}$) の結晶においては、温度 1 度の変化で透過波長は 0.3Å も変化するため、0.1 °C より良い温度安定性が必

要であり、透過幅 0.125\AA を実現する厚みの方解石の結晶においては $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ より良い温度安定性が必要となってくる。そのためリオフィルターでは詳細な温度管理が必須である。UTF-32 も $1/8\text{\AA}$ ブロックもそれぞれ温度管理を行っている。そのメカニズムとは以下の通りである。光学素子の周りにヒーターを取り付け、熱を加えることで一定の温度（約 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）となるようにする。また、それとは別にブロック内の方解石に直接温度センサーを取り付け、方解石の温度を測定する。方解石の温度は、観測波長を変えるとき（液晶に印加する電圧を変えるとき）に 100 回測定しその平均を取り、さらに、その温度と、同様に一定時間内に測定した温度との平均値を方解石の温度とすることで統計誤差を低減している。そして、方解石の温度変化による屈折率のずれは液晶の印加電圧を変化させることで補正（温度補正と呼ぶ）している。

このメカニズムがうまく働いているか確かめるため、方解石の温度が変化したときの $1/8\text{\AA}$ ブロックの透過プロファイルの安定性を調べる実験を行った。なお、この実験では、方解石の温度はヒーターの設定温度を変えることで大きく変化させたが、実際に太陽光のあるなしで $1/8\text{\AA}$ ブロック中の方解石の温度が、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度変化することは確認されている。

図 23 がその実験結果である。図 23 上は時間とともに方解石の温度がどのように変化したかを示したものである。図 23 左下は、温度補正をしていない場合、すなわち、方解石の温度変化による屈折率のずれを液晶への印加電圧を変化させることで補正していない場合を示している。この時、温度が $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 変化することで位相はおよそ 35 ° ~ 40 ° 程度変化しているが、これが、方解石の温度変化によって生じた遅延そのものである。図 23 右下は、温度補正をした場合、すなわち、方解石の温度変化による屈折率のずれを液晶への印加電圧を変化させることで補正した場合の透過波長のずれを透過周期の位相ずれとして示している。この時、温度が $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 変化することで位相はおよそ 6 ° ~ 7 ° 程度の変化となっているが、これは、温度補正を行うことで方解石の温度変化によって生じた遅延量を補正した結果である。温度制御メカニズムはいい方向に働いていることは示されたものの、完全ではなく、少しずれが残ってしまっていることが示された。このずれが、UTF-32+ の透過プロファイルに影響していると考えられる。そして温度変化と位相変化の間にはヒステリシスのようなものがあることがわかった。

このヒステリシスが生じる原因としていくつか原因が考えられる。1 つは、 $1/8\text{\AA}$ ブロックに用いられる方解石は分厚いため、方解石の端につけた温度計が示す温度と方解石の中心部の温度にずれが生じ、それによって方解石の温度が正しく測れていないこと、または、温度の時間変化が大きいため、過去の一定時間内の温度を平均して温度の平均を出すことで現在の温度とする、という手法に問題があったことなどが挙げられる。今回分かったことはここまでであるが、このことについては、今後さらに検証する必要があると

測定日: 2018/12/15 -16

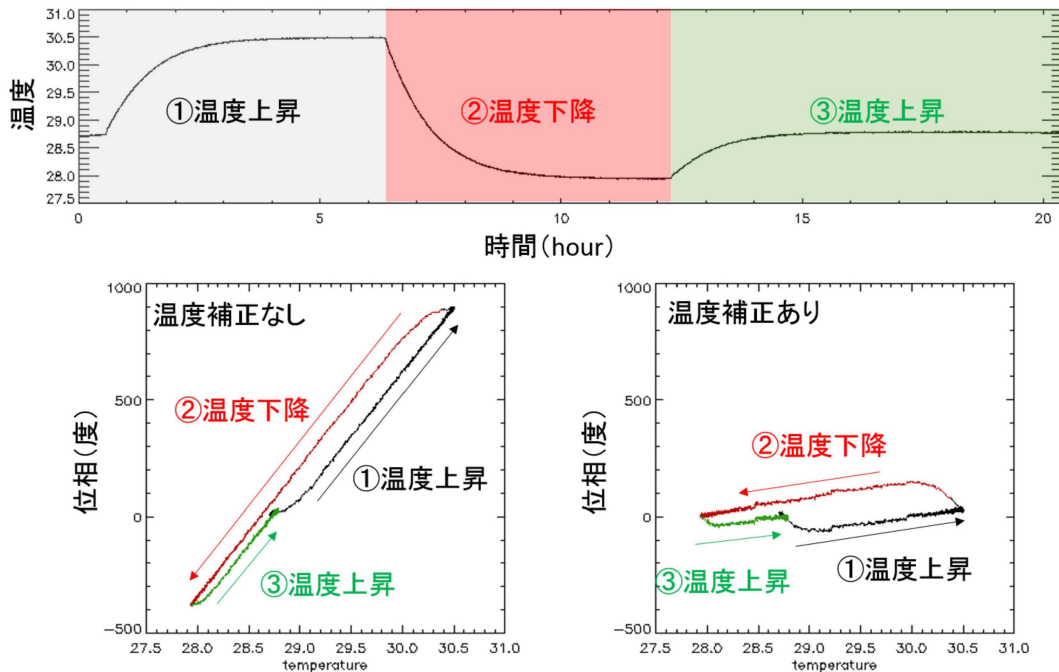


図 23 上：時間に伴う方解石の温度変化。フィルターを取り付けたヒーターの設定温度を変えることで温度を変化させている。下：温度変化に伴う $1/8\text{\AA}$ ブロックの透過プロファイル波長ずれ（左は温度補正なしの場合。右は温度補正ありの場合。）温度補正は有効に機能しているものの完全ではなく、またヒステリシスも見られる。

考える。

なお、現段階取ることができる対処法としては、フィルターに光を入れ始めてすぐはフィルターの温度が急激に変わってしまうため、ある程度フィルターの温度が安定してから観測を始めること、もしくは観測プログラムを変更し、フィルターの温度が一定以上変わった際などには、観測をいったん中止し、各層の中心波長を合わせなおしてからまた観測を開始するようにする、などが考えられる。

ちなみに、各層の中心波長を合わせる際は、各層の印加電圧を調節しながら UTF-32+ 全体の透過光の変化を調べることで行っている。例として $H\alpha$ 線近傍で中心波長合わせを行う際の操作手順を示す。まず、太陽光を入れた状態でフィルターの設定波長を $H\alpha$ 線中心にする。このとき多少の中心波長ずれがあっても構わない。次に、 16\AA ブロックの印加電圧を変化させ、遅延量を 30 度刻みで -180 度から $+180$ 度までの範囲で振りながら画像を取得する。得られた各遅延量における画像の光度平均をそれぞれ計算すると、遅延量

変化に対して正弦波的な変動を示す。これは、 $H\alpha$ 用のブロッキングフィルターの透過幅が約 20\AA であることに起因するもので、透過光度が最大となる点において、 16\AA ブロックの透過中心波長がブロッキングフィルターの透過中心波長とほぼ一致しているを見なすことができる。次に 8\AA ブロックの印過電圧を 16\AA ブロックの時と同様に変化させ、画像を平均して透過光度を求める。やはり透過光度は正弦波的振る舞いを示すが、今回は光度が最小となる点において 8\AA ブロックの透過中心波長が $H\alpha$ 線中心と一致する。これは、 16\AA ブロックでは透過幅が広いため $H\alpha$ 線による寄与が無視できていた一方で、 8\AA ブロックでは透過幅に比較して $H\alpha$ 線幅が無視できない大きさになり、透過中心波長が $H\alpha$ 線中心と一致した時に透過光度が最小値となるためである。これは 8\AA ブロックよりも透過幅の小さいブロックについても同様で、以下同じ手順を 4\AA 、 2\AA 、 1\AA 、 0.5\AA 、 0.25\AA の順番で各ブロックに対して行うことで、7層すべてのブロックの透過中心を一致させることが出来る。次に、7層の透過中心を合わせたまま透過波長をシフトさせながら透過光度の計測を行う。結果として、 $H\alpha$ 線プロファイルをフィルターの透過幅 0.25\AA で畳み込んだプロファイルを得ることが出来る。このプロファイルの最小となる点が $H\alpha$ 線中心に相当する。以上の手順により、分光的手段によらずに撮像データからフィルターの各層の中心波長合わせ及び、 $H\alpha$ 線中心位置を求めることが可能となる。さらに微調整として、フィルターの透過波長を $H\alpha-4\text{\AA}$ の連続光領域に設定したのち、今度は透過波長幅の小さい順に、透過光度が最大となる電圧を求めていく。すでにある程度透過中心が揃っているフィルターを連続光領域にて微調整を行うことで、より正確に各層の中心波長を一致させることが可能となる。

5 まとめ

温度制御や $1/8\text{\AA}$ ブロックの on/off 機能の切り替えに問題は残るものの、本開発により、UTF-32 と $1/8\text{\AA}$ ブロックを合わせて用いることで、フィルターの透過波長幅がこれまでの半分である、 $H\alpha$ 付近で 0.125\AA となり、これまでの $H\alpha$ に加えて、 $\text{MgI } 5172\text{\AA}$ 、 $\text{CaII } 8542\text{\AA}$ 、 $\text{HeI } 10830\text{\AA}$ の 4 波長で観測可能となった。透過率は $H\alpha$ が 0.20、 $\text{MgI } 5172\text{\AA}$ が 0.04、 $\text{CaII } 8542\text{\AA}$ が 0.15、 $\text{HeI } 10830\text{\AA}$ が 0.05 程度であり、これらの波長で彩層の構造も観測された。今後さらなる性能改善の余地は残されているが、複数ラインによる彩層の多面的物理診断に活用されることが期待される。

なおこの報告は、2018 年度修士論文 (徳田怜実) をもとに、抜粋、改訂したものである。

参考文献

- [1] M. Hagino, K. Ichimoto, G. Kimura, Y. Nakatani, T. Kawate, K. Shinoda, Y. Suematsu, H. Hara, and T. Shimizu. Development of a universal tunable filter for future solar observations. In *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*, Vol. 9151 of *SPIE*, p. 91515V, July 2014.
- [2] K. Ichimoto, K. Shinoda, T. Yamamoto, and J. Kiyohara. Photopolarimetric measurement system of Mueller matrix with dual rotating waveplates. *Publications of the National Astronomical Observatory of Japan*, Vol. 9, pp. 11–19, 2006.