

乗鞍コロナ観測所における液晶遅延素子を用いた 汎用偏光解析装置の開発

篠田一也, 一本 潔, 福田武夫, 辛 準鎬

(2001年4月2日受理)

A Universal Polarimeter Using Liquid Crystal Variable Retarders at the Norikura Solar Observatory

Kazuya SHINODA, Kiyoshi ICHIMOTO, Takeo FUKUDA, and Junho SHIN

Abstract

A universal Stokes polarimeter was developed for the 25-cm coronagraph of the Norikura Solar Observatory. The polarimeter utilizes two liquid crystal variable retarders (LCVR) as the polarization modulator and a Savart plate as the polarization analyser. By controlling the voltages applied to LCVRs, modulations of the polarization states are achieved more flexibly and efficiently in a wavelength range of 450–1,600 nm. The polarimeter is installed at the primary focus of the coronagraph to minimize the instrumental polarization caused by optics. Two orthogonal polarization states are measured simultaneously to minimize the effect of guiding errors and seeing effects. Combined with the coronagraph and the high resolution spectrograph at the coude focus, the polarimeter enables us not only observations of photospheric Zeeman effect but also various types of diagnostics of the solar atmosphere, including coronal Zeeman effect, Hanle effect, impact polarization, and Stark effect.

1. はじめに

太陽表面では常に多種多様な現象が起きている。それらのほとんどが太陽自身が持つ磁場によって引き起こされていると考えられている。その磁力線は太陽表面のさらに上層にまでおよび、太陽コロナ中でも様々な磁気プラズマの活動現象を引き起こしている。

それらの現象を総合的に理解するには、その基本メカニズムを支配している磁場や電場を直接検出し、その物理過程を検証する必要がある。磁場や電場の検出は偏光観測によって可能であるが、これまではほとんどの場合、単一波長で、しかも光球の磁場しか観測されてこなかった。彩層・コロナの磁場や電場を検出しようとする試みはきわめてまれである。多様な現象を総合的に見るには、コロナ・彩層のスペクトル線を含む複数の波長で連続的に偏光観測を行うことが強く望まれる。

上記のような偏光観測を実現するには、幾つかの条件がある。希薄なコロナを観測するのであるから、大気や塵などの影響による散乱光や揺らぎを軽減する必要がある。

り、それには大気が薄く地表面から離れた高山が有利である。スペクトル線輪郭による物理診断を可能とするためには、高分散で高精度の大型分光器と、その大型分光器まで光を導くクーデ型コロナグラフが必要である。さらに、光学系による人為偏光の影響を少なくするために、そのコロナグラフには、対物レンズの一次焦点に偏光解析装置を設置するための空間がなければいけない。現段階では、乗鞍コロナ観測所 25 cm クーデ型コロナグラフ¹⁾はこれらの条件を満たした最適の望遠鏡であると言える。

乗鞍コロナ観測所では、これまでも波長板を用いて複数の波長で偏光観測ができる偏光解析装置の開発²⁾が行われてきた。現在、我々は、回転式波長板に代わり液晶遅延素子 (Liquid Crystal Variable Retarder: 以下 LCVR) を用いて、汎用性を高め、パソコンによって容易に制御できる偏光解析装置を開発し、観測を行っている。

2. 液晶遅延素子 (LCVR)

2.1 原理

液晶は固体と液体の中間の状態です。液体ほど分子が自由に動き回っていないが、固体のように規則正しく並んではない。この液晶という状態は、すべての物質に見られるのではなく、そのほとんどは有機化合物である。液晶の大きな特徴は、電界、磁界の影響を受けて複屈折の状態が変わることである。LCVRはこの特徴を活かして、電極に高周波電圧を印可することにより複屈折の状態を制御し任意の波長の遅延を行う。

ネマティック液晶と呼ばれる棒状の分子の液晶を、一面に細い溝がある2枚のガラス基板ではさみ、分子の向きをガラス基板と平行にする。そして、酸化インジウムの透明電極を両面に貼り付ける。この電極に印可電圧がない場合は、ガラス基盤の溝に沿うように液晶は整列している。電極に高周波電圧（今回使用した製品の場合2kHz）を印可すると、液晶分子はランダムな運動を始め、電圧を上げていくとその運動量が増加し、遅延量は減少する。液晶分子の運動量には温度依存性があるので、温度センサーを取り付けて常にモニターし、温度変化に合わせて電圧を微調整する。原理的にはこれだけでは遅延量は0以下にはならない。実際の観測では、2個のLCVRの遅延量の組合せによって多様な偏光状態を観測するが、マイナスとなる遅延量も必要である。そのため今回使用したLCVRには、補正板（波長板）が貼り付けてあり、遅延量をマイナス側にシフトさせてある。

以下に今回使用したLCVRの仕様と、回転式波長板と比較した場合の利点、欠点をまとめる。

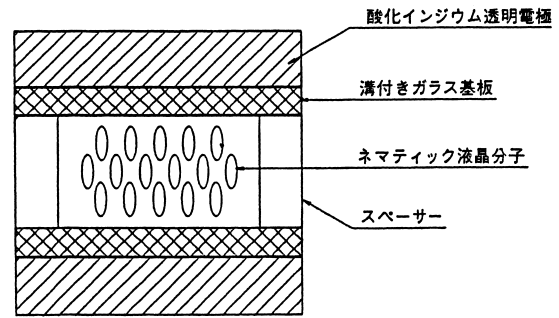
- LCVRの利点
 - ア) 可動部分がないので、像が動かない。
 - イ) 幅広い任意の波長に対して、所定の遅延量を与えられる。
 - ウ) 応答時間が速い。
 - エ) 自由度の高い偏光変調が可能である。
 - オ) 遅延量の入射角依存性が小さい。
- LCVRの欠点
 - ア) 温度依存性がある。
 - イ) 紫外線に弱い。

2.2 LCVR 遅延特性実験

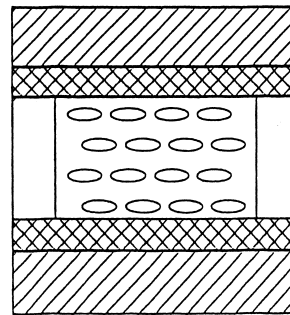
液晶分子の運動は温度に依存し、その結果、LCVRの

表 1. LCVR の仕様.

有効径	40 mm
可変遅延範囲	-1/4 波長 ~ +1/2 波長
遅延可能波長	450 ~ 1,600 nm
温度依存性	0.2 (%/°C)
使用温度	10 ~ 40°C
応答時間	40 ミリ秒以下
製造会社	メドウラーク社 (アメリカ)



最小遅延量 (電圧 10 V 以上)



最大遅延量 (電圧 0 V)

図 1. LCVR の原理.

遅延量が変動してしまうので、温度の変化に合わせて電圧を調整し、遅延量を補正しなければいけない。それには、個々のLCVRの温度に対する遅延量（適正電圧）の変化特性を知る必要がある。

下記の実験では、一定波長で一定温度でのLCVRの遅延特性をまず求め、次に温度を変えて（約15, 25, 40°C）、同じ実験を繰り返して温度特性を求めている。更に波長による特性を求めるために、レーザー光源（6328 Å）をハロゲンランプと干渉フィルターに置き換えて可視域（4,317, 5,303 Å）と赤外域（10,540 Å）でも同じ実験を繰り返した。

• LCVR 特性実験

- ① 図2のようにポラライザと偏光軸を45度ずらしてLCVRを設置する。
 - ② LCVRの電圧を固定し、回転ポラライザを回転させ、光量変化を記録する。
 - ③ これを0~20Vまで電圧値を変えながら繰り返す。
 - ④ 電圧によって振幅がそれぞれ違う余弦曲線が得られる。（図3参照）
 - ⑤ この振幅の変化より、それぞれの電圧での遅延量が求まる。
 - ⑥ これで一定温度での電圧-遅延量の関係が求められる。
 - ⑦ 温度を変えて、同様の実験を繰り返す。
 - ⑧ これにより温度特性が求められる。（図4参照）
- 上記実験の⑤で遅延量を求めているが、これはストークスパラメータとMueller行列によって導出してい

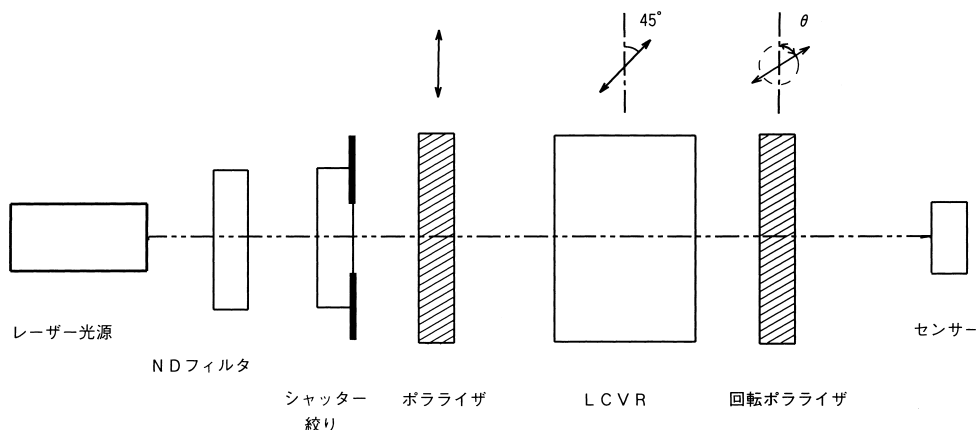


図2. LCVR 検定実験.

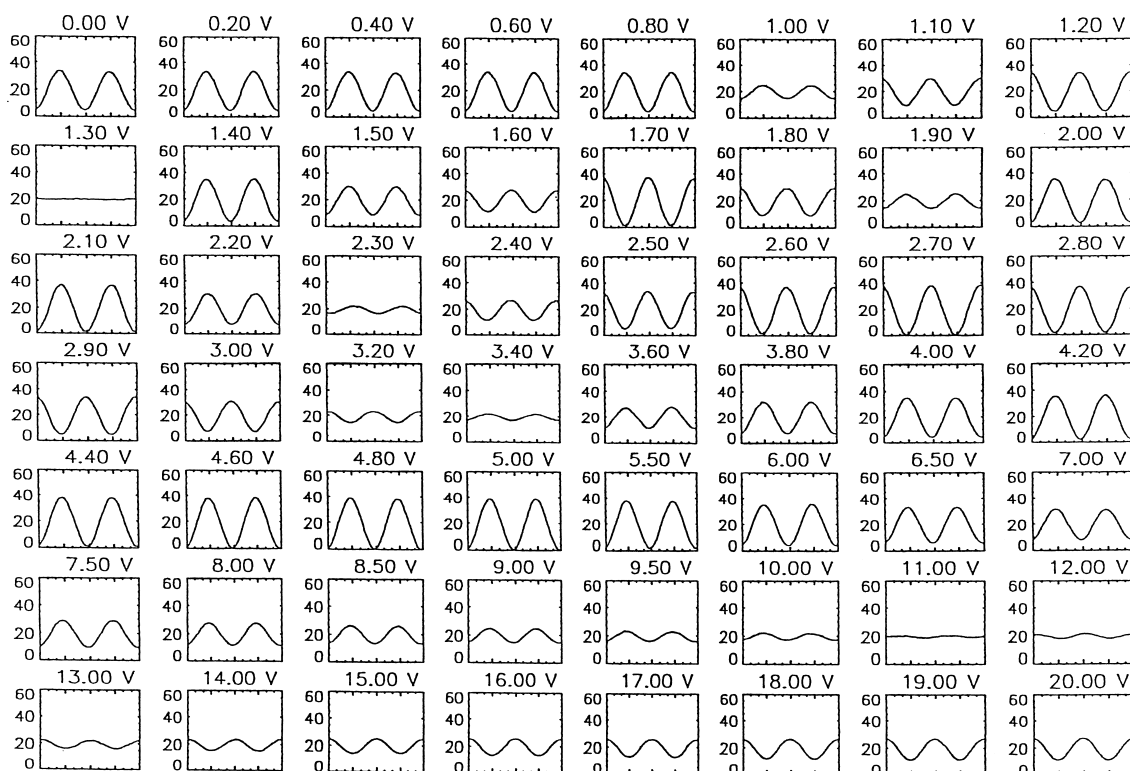


図3. LCVR 電圧特性 1.

る。出射光のストークスパラメーターを I' 、偏光板を通過した後の光を I 、LCVR と回転偏光板の Mueller 行列を M_S, M_L とすると、

$$I' = M_L M_S I \quad (1)$$

となる。ここで各素子が理想的であるとすると、

$$I = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$M_L = 1/2 \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\phi + \sin^2 2\phi \cos \delta & \sin 2\phi \cos 2\phi (1 - \cos \delta) & -\sin 2\phi \sin \delta \\ 0 & \sin 2\phi \cos 2\phi (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\phi + \cos^2 2\phi \cos \delta & \cos 2\phi \sin \delta \\ 0 & \sin 2\phi \sin \delta & -\cos 2\phi \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。 δ, ϕ はそれぞれ LCVR の遅延量および軸の角度、 θ は回転偏光板の角度である。これより、

$$2I' = 1 + (\cos^2 2\phi + \sin^2 2\phi \cos \delta) \cos 2\theta + \sin 2\phi \cos 2\phi (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \quad (5)$$

特に、 $\phi = 45^\circ$ のとき、

$$2I' = 1 + \cos \delta \cos 2\theta \quad (6)$$

を得る。 θ をいろいろ変えて I' を測定することにより、

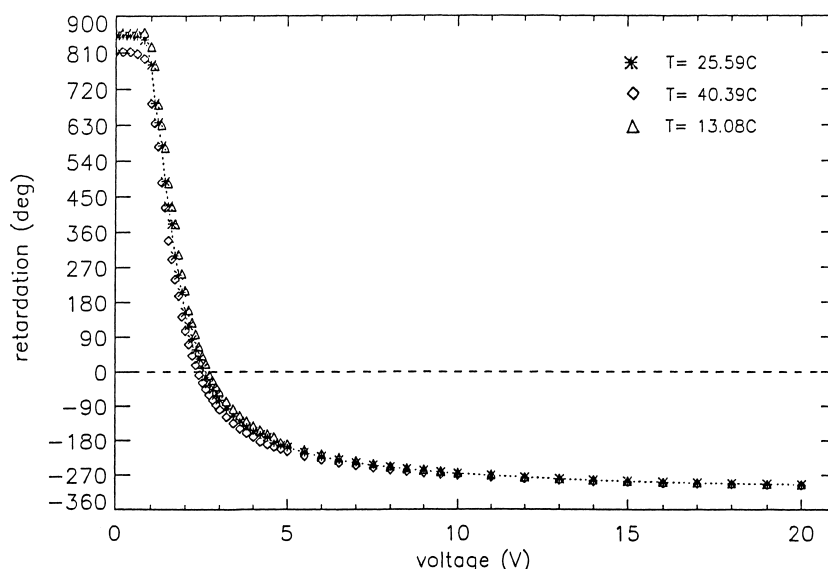


図 4. LCVR 電圧特性 2.

遅延量 δ を求めることができる。

3. 乗鞍偏光解析装置

3.1 偏光解析装置の構成

乗鞍偏光解析装置の構成は、図 5 のようになっている。マスクは直径 200 mm のアルミ円盤で、中心部に図 6 のような 4 mm × 15 mm の窓が開いている。この窓のエッジ部分がオカルティングディスクのエッジ代わりとなる。対物レンズの一次焦点にあたり、高温になるためエッジ部分には熱に強く薄くても丈夫なモリブデンを使用した。液晶分子は、紫外線により変質してしまうので、LCVR の直前に UV カットフィルターを入れてある。その後ろに、fast 軸を互いに 45 度傾けた 2 個の LCVR とサバル板がある。サバル板は 2 個の方解石で、像を偏光軸が互いに直行する二つの像に分離させ 4 mm 離れるように設計した。これによって、互いに直交する二

つの偏光情報を、横に並べて同時に取得することができる。それと同時に、LCVR を透過してくる光線の偏光フィルターとしての役割も併せ持っている。マスクと 2 個の LCVR は、それぞれ独立に微調 (± 2 度) のために回転できるように設計した。

このような設計概念で組み立てた乗鞍偏光解析装置を、他の光学系による偏光の影響を少なくするために、25 cm クーデ型コロナグラフの一次焦点に設置し、後に続く分光器および検出器により、多様な偏光状態のスペクトルを取得する。

3.2 較正実験

観測波長に対して LCVR を所定の測定状態にするためには、LCVR に発生する遅延量と印可電圧の関係を知らなければならない。また、LCVR の遅延量は、電圧のみならず波長や温度の関数である。これらについては前

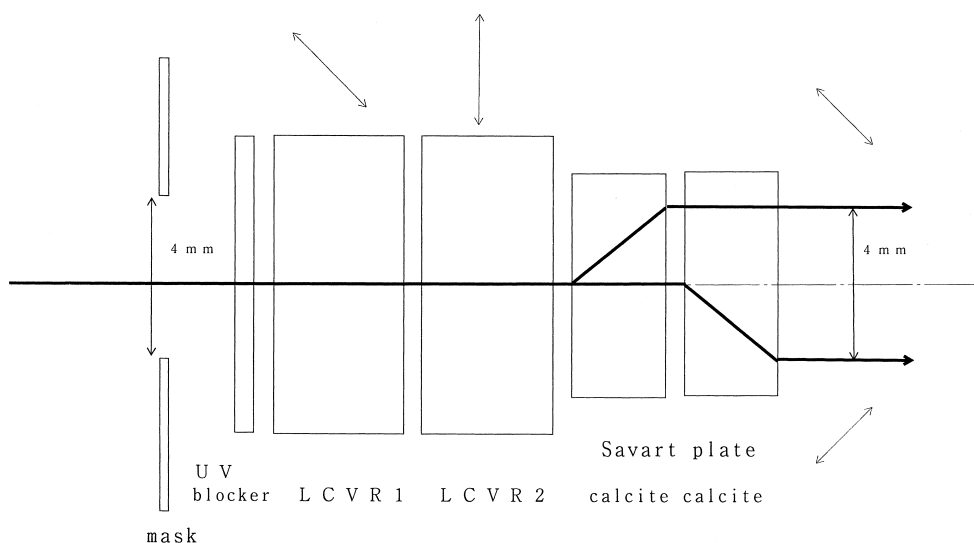


図 5. 乗鞍偏光解析装置の構成。

表 2. 遅延量と偏光成分.

LCVR 遅延量 (度)		偏光成分
LCVR1	LCVR2	
0	90	$I \pm V$
0	-90	$I \mp V$
90	0	$I \pm Q$
90	180	$I \mp Q$
90	-90	$I \pm U$
90	90	$I \mp U$

章の実験で求めることができる。それ以外にも組立時に生じる LCVR の fast 軸の角度誤差や、若干ではあるが標高差（気圧差）による変動もあることが、観測経験から分かってきた。fast 軸の角度修正は何度か試みたが、非常に微妙な調整となり、現在の構造では正確に調整するのは困難であった。これらに起因する誤差をまとめて較正するために、LCVR とサバル板を偏光解析装置として組み立てた後、下記のような実験を観測直前に観測所内で行った。

- ① 図 8 のように実験装置に乗鞍偏光解析装置をセットする。ポラライザは、サバル板により分離された直線偏光の片方を完全に消し去るような角度に固定する。残りの直線偏光が光量センサーにマスクの像を結ぶように結像レンズを設置する。
- ② 回転ポラライザは、図 6 で示した直線偏光 +Q と同じ方向に固定する。
- ③ LCVR1 の電圧を固定し、LCVR2 の電圧値をスキャンさせ、センサーによって計測される光量の変

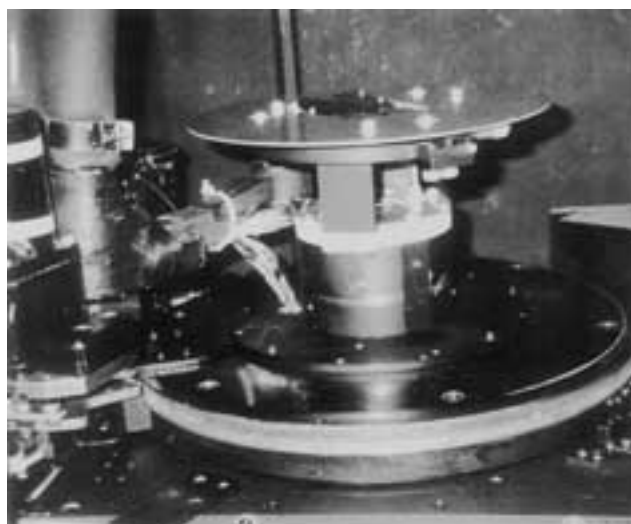


図 7. 一次焦点に取り付けられた乗鞍偏光解析装置.

化を記録する。

- ④ LCVR1 の電圧値を適当な間隔で 0~20 V までスキャンさせながら、③を繰り返す。
- ⑤ 以上によって透過光量が最大となる LCVR1, 2 のそれぞれの電圧値の組合せが求められる。
- ⑥ さらに、回転ポラライザをその他の直線偏光状態 (-Q, +U, -U) の角度に設定し、同様の実験を繰り返す。
- ⑦ (+Q, -Q)(+U, -U) のような組合せで透過光量の分布図を重ね合わせる。(図 9a, b 参照)
- ⑧ お互い最大光量と最小光量が重なっているポイント

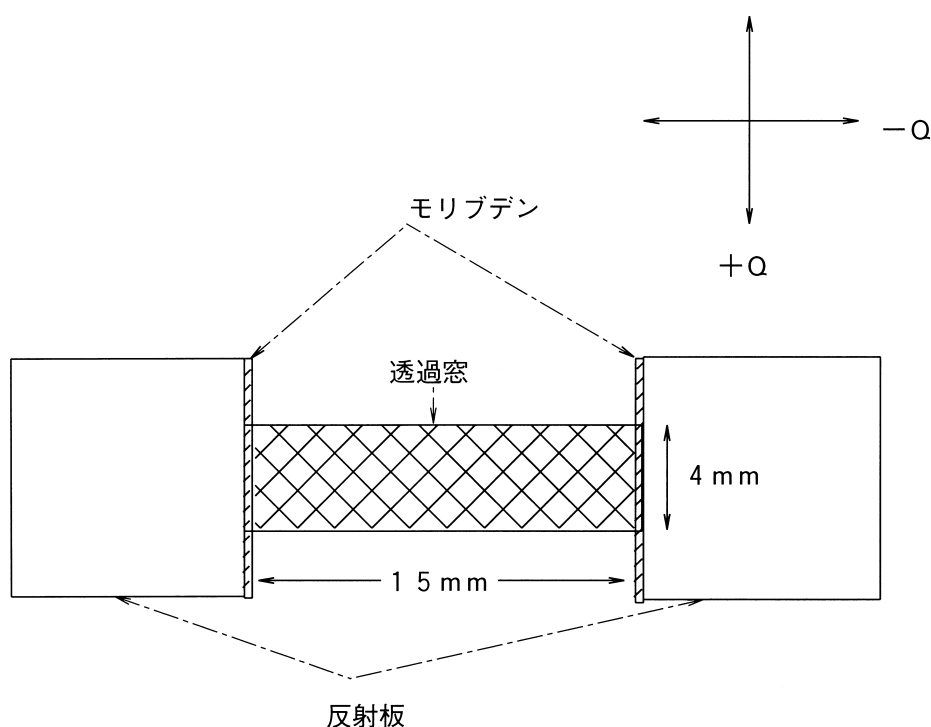


図 6. マスク上の窓. 4 mm×15 mm の短辺側にモリブデンのエッジが取り付けられている。この短辺が直線偏光 -Q の軸と一致する。

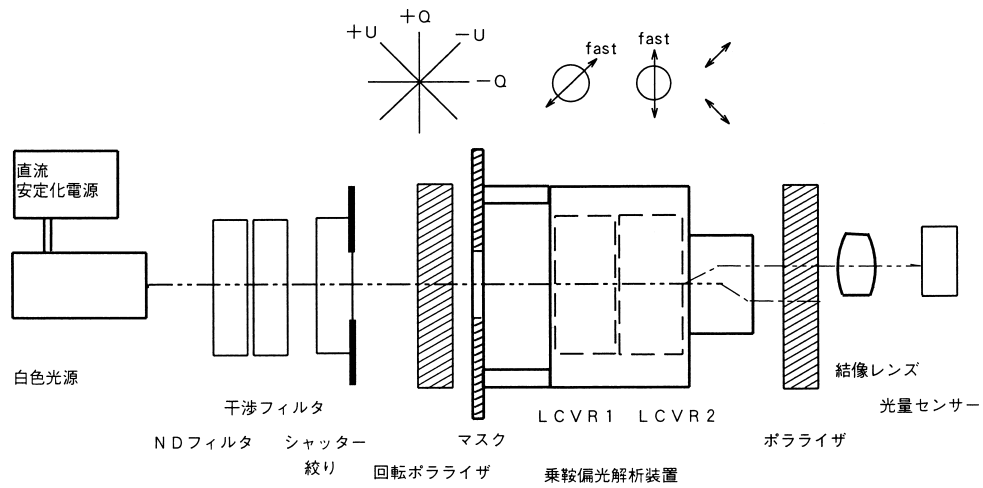


図 8. 乗鞍偏光解析装置較正実験.

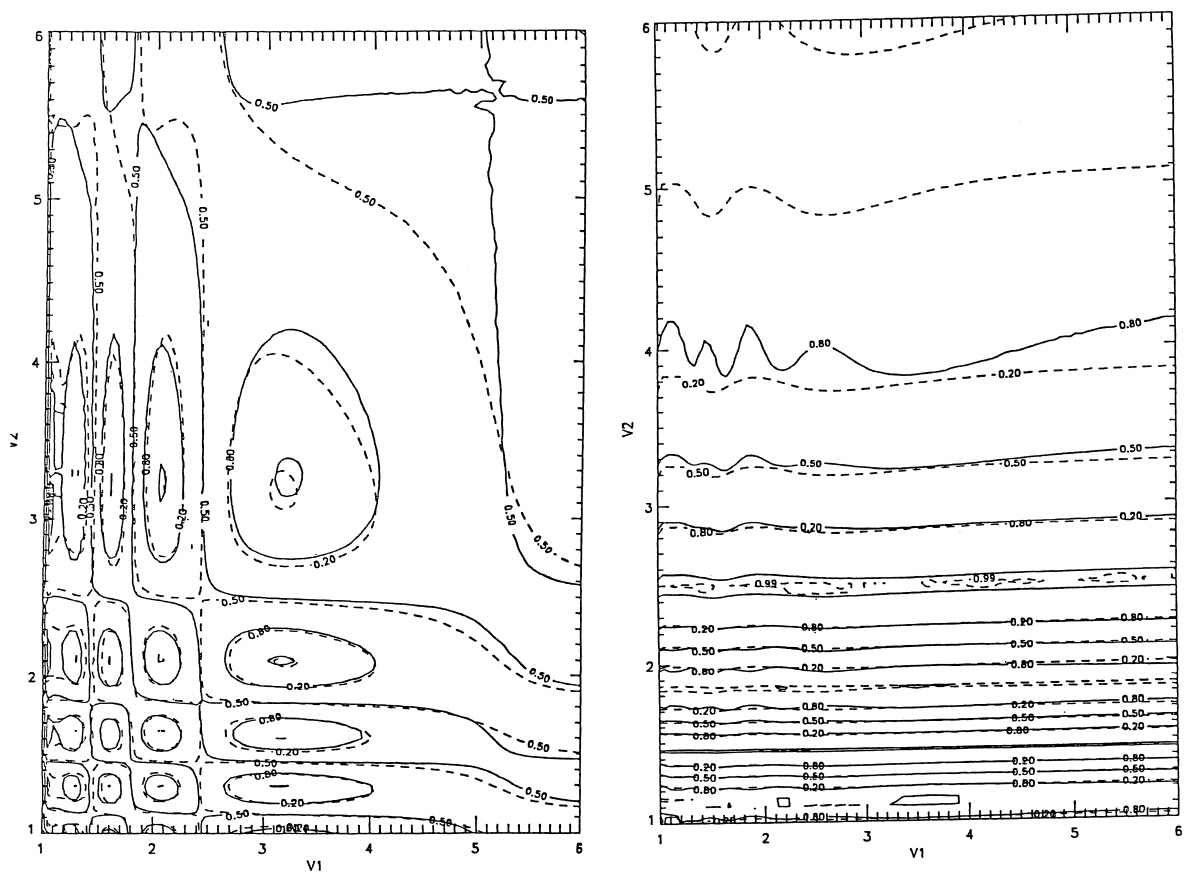


図 9. a. (+Q, -Q). 横軸は LCVR1 の電圧値, 縦軸は LCVR2 の電圧値. 実線は +Q, 破線は -Q のときの最大光量値を 1 としたときの光量値を示す. b. (+U, -U). 横軸は LCVR1 の電圧値, 縦軸は LCVR2 の電圧値. 実線は +U, 破線は -U のときの最大光量値を 1 としたときの光量値を示す.

表 3. 実験に使用した干渉フィルター.

波長 (Å)	4375	4880	5162	5906	6344	6962	7525	8419	9064	11000
透過率 (%)	40	45	50	50	50	50	45	45	45	40
半値幅 (Å)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

が補正電圧値の組合せとなる.

なお, この実験は干渉フィルタを交換して, 表 3 にあるような複数の波長について行った.

この実験の結果を基にして, 観測波長 (λ) と偏光状態 (+Q, -Q, +U, -U, +V, -V) を入力することにより, リアルタイムで温度 (T) を読みとり適正電圧 (V) を導き

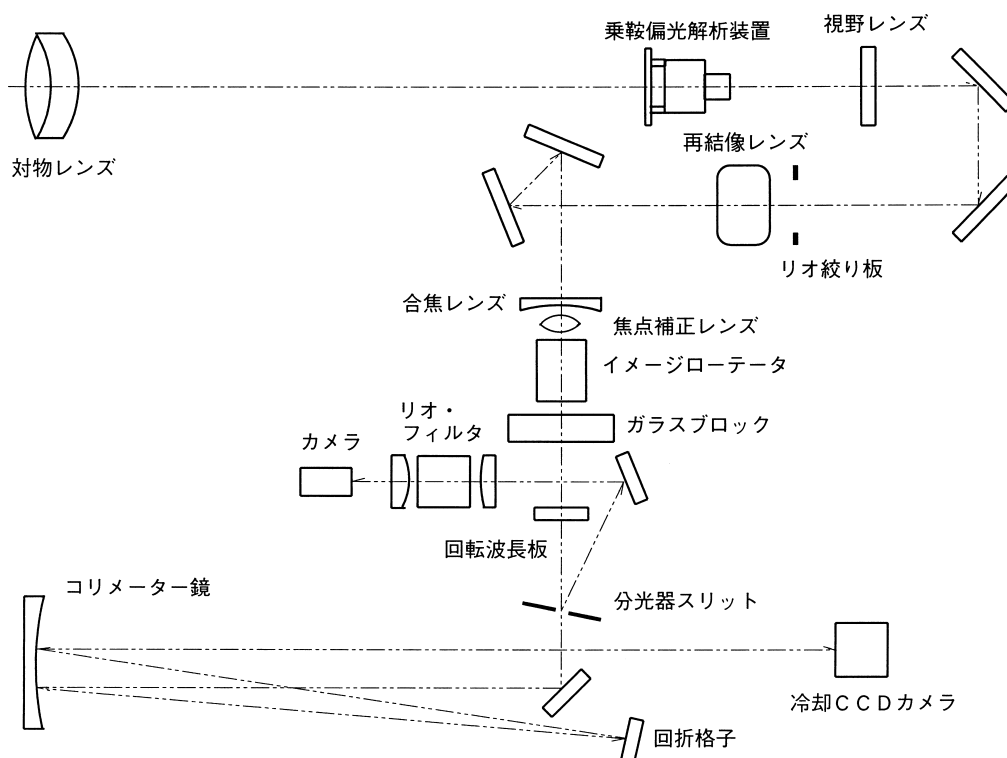


図 10. 25 cm コロナグラフ光路図.

出すプログラムを作成した。温度と電圧の関係は式 (7) のようになっており、関数 c_i ($i=0, 1$; LCVR1, 2 に対応) は式 (8) のように波長 λ の多項式でフィッティングして求める。

$$V(\lambda, T) = c_0(\lambda) + c_1(\lambda)T \quad (7)$$

$$c_i(\lambda) = a_{0i} + a_{1i}\lambda + a_{2i}\lambda^2, \quad i=0, 1 \quad (8)$$

式 (8) の係数, a_{0i}, a_{1i}, a_{2i} , を LCVR1, 2 と各偏光状態 (+Q, -Q, +U, -U, +V, -V) のそれぞれについて, 上記実験より求めて補正データとして保存してある。

4. 観測システム

4.1 25 cm コロナグラフ光学系

乗鞍偏光解析装置を 25 cm コロナグラフ内に取り付けるにあたって, 多少の光学系の変更が必要である。25 cm コロナグラフ内の光路は, 図 10 のようになっている。対物レンズの一次焦点近辺にあるオカルティング・ディスクの回転移動ステージに乗鞍偏光解析装置を取り付けるが, 乗鞍偏光解析装置の光学厚みのために本来の光路長と差が出てしまう。その差を補正するために合焦レンズと分光器スリットの間に焦点補正用凸レンズ (f 2,000 m 眼鏡用レンズ) を設置した。

図 11 の左図のような黒点の像がマスク上に投影され, サバル板を通過すると, 互いに直交した偏光軸を持つ直線偏光の像に分離される。この二つの黒点像が並んで分光器スリット上に投影されるように, イメージローテータを回転させ, 図 11 の右図のように黒点像の同じ位置にスリットがくるように調整する。

鏡筒内の折り返し鏡や分光器内の光学系は直線偏光に

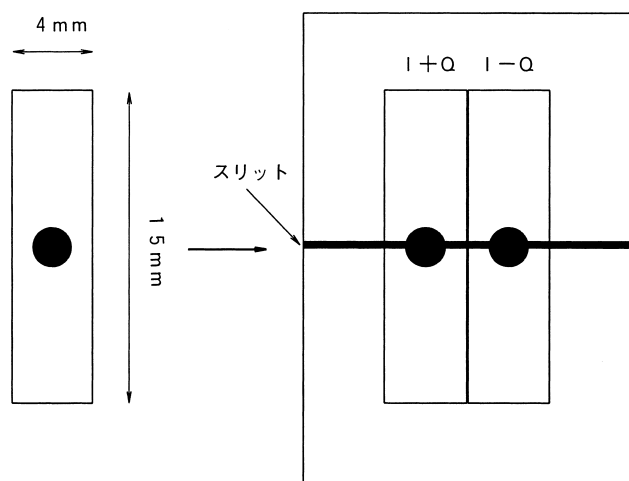


図 11. スリット上の黒点像。左図がマスク上に投影された黒点像。右図が分光器のスリット上に投影された黒点像。

表 4. 光学系諸元.

対物レンズ口径	30 cm
一次焦点距離	5 m
合成焦点距離	8.8 m
有効口径	25 cm
分光器焦点距離	7 m
線分散度 (5000 Å, 4 次)	2.28 mm/Å
ポリリメーター上の像	4 mm × 15 mm
観測視野角 (スリット方向)	160" (40"/mm × 4 mm)
CCD カメラ有効面積	13.5 mm × 13.5 mm
CCD カメラ画素数	512 × 512

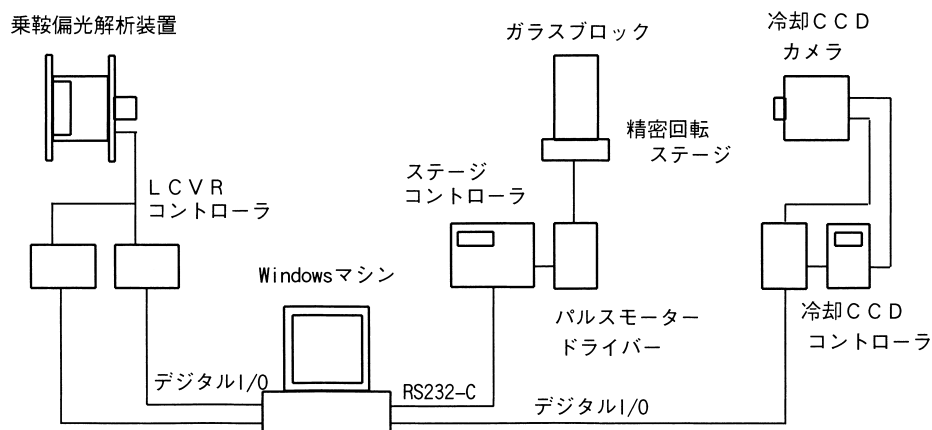


図 12. 観測装置制御システム.

対して反射率が異なるため、分離された像は CCD 上で光量差を生じる。そこで分光器スリットの直前に光量バランス用の波長板を置き、回転角度を調節して直線偏光を適当な楕円偏光に変換し CCD カメラ上での光量バランスを調整している。

4.2 制御系

観測制御は、DOS/V マシンにより各コントローラを介して行われる。(図 12 参照) 制御プログラムは、IDL (Interactive Data Language: RSI 社) 上から C 言語で作成した DLL (ダイナミックリンクライブラリー) を呼ぶことにより乗鞍偏光解析装置と像スキャン用のガラスブロック、CCD カメラをコントロールしている。分光器を使用した観測なので、空間的次元のデータであるが、ガラスブロックを回転させることによってスリットに対して直角方向に像をスキャンさせて、つなぎ合わせて二次元画像にすることができる。

IDL で観測メニューをたちあげ、観測波長、偏光成分、スキャン幅、露出時間、画像サイズ等を選定し観測を開始する。制御プログラムは、LCVR の温度センサー

の値と波長、偏光成分の関係から適当な電圧をリアルタイムに計算し LCVR に与える。通常の観測では、偏光成分は 6 セットを取得し一つのファイルに保存される。

5. 乗鞍偏光解析装置による観測

CCD 上にはサバール板によって分けられた二つの直行する偏光スペクトルが同時に写る。偏光観測は通常、片方のスペクトルが $I+Q, I-Q, I+U, I-U, I+V, I-V$ となるように 2 個の LCVR をそれぞれ制御し、6 回の露出を行うことによって達成される。図 13 は Fe I 6303 Å による黒点の観測例である。これから偏光率 Q, U, V はそれぞれ 2 回の露出 (計 4 枚のスペクトル) を用いて求められる。(図 14 参照)

このように通常観測においては同じ偏光情報 (例えば $I+Q$) を 2 度撮ることになり、原理的には冗長な情報を取得していることになる。しかしこれによって、以下のように偏光測定の高めることができる。すなわち、2 偏光を同時に取得することによって 2 回の露出間の像の揺らぎによる疑似偏光シグナルを抑え、CCD 上の同じ場所で $+ -$ 両偏光を取得することによって検出器

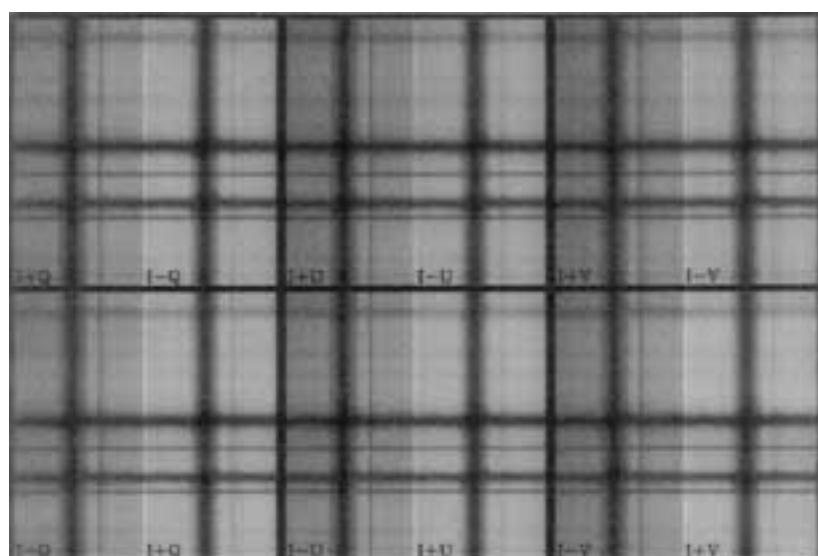


図 13. Fe I 6303 Å による黒点の観測例。縦の黒い帯が黒点。

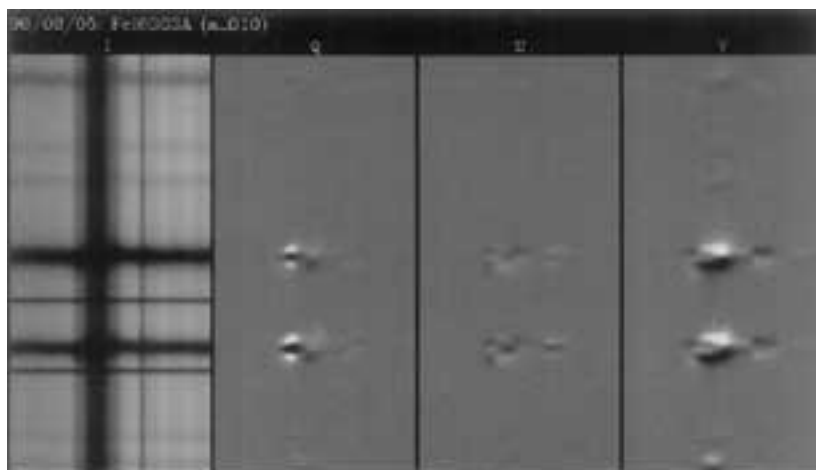


図 14. Fe I 6303 Å による黒点の I, Q, U, V スペクトル. 黒点において典型的な偏光プロファイルがみられる.

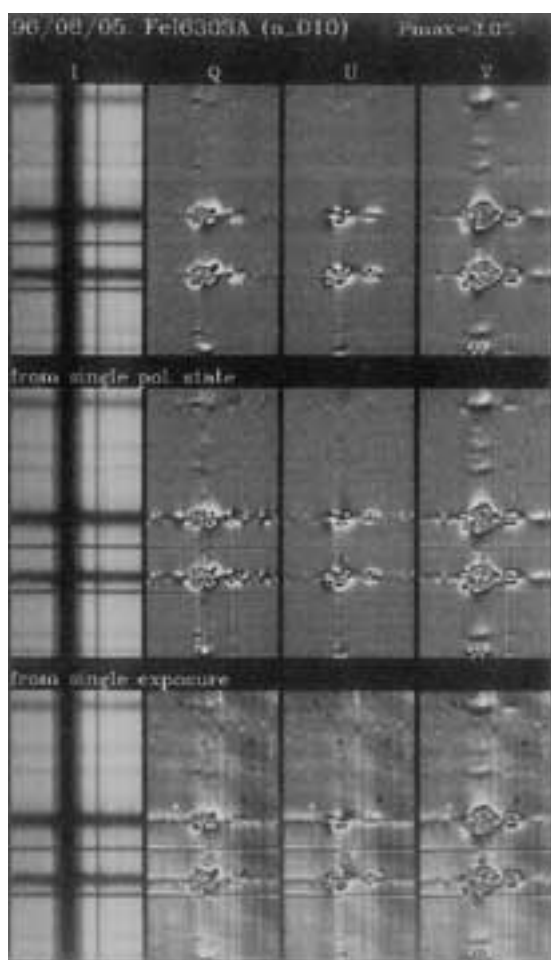


図 15. 実験的に求めた Fe I 6303 Å による黒点の I, Q, U, V スペクトル. 上から, 得られたスペクトルをすべて使った場合, CCD 上の片方のスペクトルのみを使った場合, 1 回の露出で得られた二つのスペクトルのみを使った場合. 濃度はすべて, $-3\% \sim 3\%$ にスケールリングしてある. 片方のスペクトルのみの場合, 2 回の露出間の像揺らぎによる疑似シグナルが発生している. 1 回の露出のみの場合, CCD の感度むらによる誤差が発生している.

の感度むらによる誤差を取り除くことが可能になる. 図 15 はこの効果をみるために, CCD 上の片方のスペクトルのみ, および, 1 回の露出で得られた二つのスペクトルのみを用いて, 実験的に Q, U, V を求めたものである. これから, とともに偏光の弱いところで $1 \sim 2\%$ の疑似偏光が生じており, 4 枚のスペクトルを用いる方法が精度を高める上で有効であることを示している.

図 16 に Fe I 6303 Å による黒点磁場の観測例を示す. 偏光率から磁場を, スペクトル線のドップラー偏移から視線方向速度を求めている.

6. 期待される観測

乗鞍偏光解析装置を使用した観測では, 主にコロナや光球での磁場方向, 強度の検出を目的としている. 具体的には以下の目的が挙げられる.

(1) コロナ中の磁場をゼーマン効果によって直接求めることは, コロナにおける物理過程を解明する上で重要であることは言うまでもない. Fe XIV 5303 Å 輝線を使えば, 0.1% の精度で円偏光を測ることによって数十ガウスの磁場を検出することができる.

(2) プロミネンスの磁場は彩層輝線のゼーマン効果やハンレ効果によって推定することができる.

(3) ディスク上のダークフィラメントは, He I 10830 Å で磁場測定が可能だが, 波長が近い光球の吸収線 Si I 10827 Å で光球磁場を同時に測定し, 光球からプロミネンスへの磁場のつながり具合を推定することができる. (図 17 参照)

(4) リム付近のプラージュや, フレアが頻発している活発な活動領域において, H α 線等の直線偏光を精度よく測ることによって衝突偏光による彩層熱流が検出できる可能性がある.

(5) 近赤外プロミネンス輝線の直線偏光輪郭で, シュタルク効果による直流電場が検出できる可能性もある.

このほかにも, 光球や彩層をいろいろなスペクトル線で精度良く観測することによって, まだ知られていない情報が引き出せると考えている.

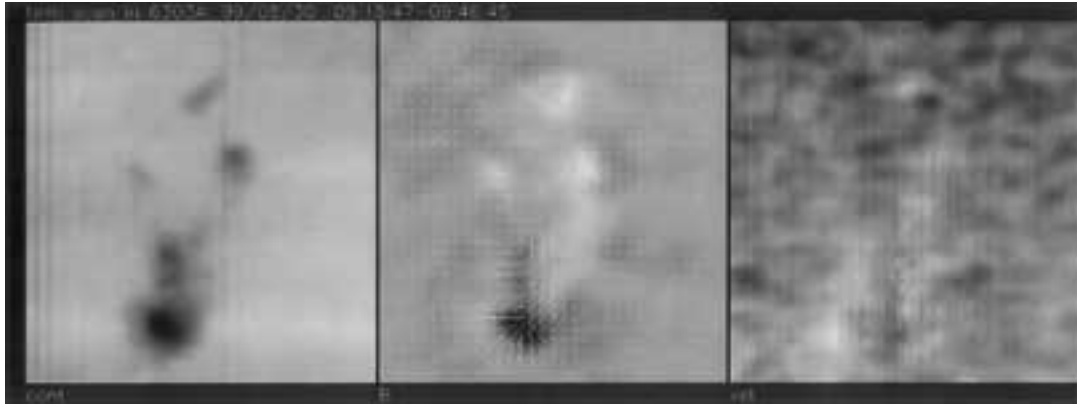


図 16. Fe I 6303 Å による黒点磁場の観測例. 左図が 6303 Å 近辺の黒点の様子, 中央が磁場強度と向き, 右図が視線方向の運動の様子.

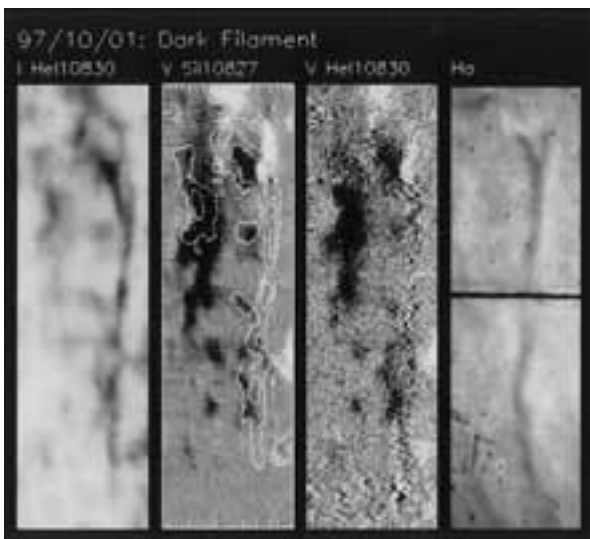


図 17. ダークフィラメントの観測例. 左から He I 10830 Å での観測, Si I 10827 Å での磁場, He I 10830 Å での磁場, H α 線監視モニタの画像 (横線は分光器スリット).

7. まとめ

乗鞍偏光解析装置は平成 8 年度に完成し観測を始めたが、その後も幾つかの改良を重ねつつ、太陽コロナの偏光観測を行ってきている。それらの具体的な成果については、共同利用者の今後の研究発表に期待したい。

しかし、一つ重要な問題点も見えてきた。電圧の補正データを得るための実験は、毎年春に三鷹構内にある実験室で行い、その場で得られた補正データの確認実験を目視で行っている。観測直前にも観測所内でその補正データを使って再度確認実験を行うのだが、そのときの偏光状態が三鷹で行った確認実験に比べてあまりよくない結果となる。最初は実験方法の問題と思われたが、観測所内で補正データを得る実験をやり直して目視での確認実験を行うと、良好な結果が得られる。同じ実験器具を使用して再度三鷹の実験室で両方の補正データを使って確認実験を行うと、三鷹で得た補正データの方がよい結果となる。このことから何らかの環境条件によって補正量変動することが考えられる。環境条件のうち、今

のところ一番影響がありそうな因子は気圧差である。製作会社のメドウラク社は、温度差を補正する制御装置を製作販売しているが、気圧差については考慮していない。今後、LCVR 単体での遅延量測定実験を外気圧を変えて行い、約 300 hPa の気圧差がどの程度影響するのか検証したい。現在は観測地点で補正実験を行うことによって、実験環境による影響を排除しており観測データには影響はないが、同様な液晶を組み込んだ観測装置を使う場合は、注意が必要である。

なお、我々はこの乗鞍偏光解析装置を、頭文字をとって nhk (Norikura Henkou Kaisekisouti) と呼んでいる。

謝辞

本観測装置を開発・製作するにあたり、多くの方からご協力いただきました。基本設計では乗鞍コロナ観測所の OB をはじめ所員の方々に、工作設計・製作では国立天文台天文機器開発実験センターマシンショップの西野徹雄、岡田則夫両氏にご協力いただき、ありがとうございました。

参考文献

- 1) 長沢進午, 清水一郎: 25 cm クーデ型コロナグラフについて, 東京天文台報, 16, 545-583 (1972).
- 2) 清水一郎, M. セメル: 乗鞍コロナグラフによる偏光観測, 東京天文台報, 18, 696-708 (1979).
- 3) 篠田一也, 一本 潔, 福田武夫, 辛 準鎬, 乗鞍コロナ観測所職員: 液晶遅延素子を用いた汎用偏光解析装置の開発, 偏光による太陽プラズマの診断ワークショップ集録, 1-9 (1996).
- 4) J. Shin, K. Shinoda, and K. Ichimoto: Experiment for the Calibration of Liquid Crystal Variable Retarders, 偏光による太陽プラズマの診断ワークショップ集録, 10-18 (1996).
- 5) 一本 潔: 乗鞍ポラリメータ・精度と観測例, 偏光による太陽プラズマの診断ワークショップ集録, 19-24 (1996).