

乗鞍コロナ観測所における緑色コロナ輝線撮像装置の開発

野口本和, 一本 潔, 田中伸幸, 熊谷收可, 篠田一也, 西野洋平,
加藤禎博, 桜井 隆, 西野徹雄, 福田武夫, 武山芸英*

(1999年10月15日受理)

Construction of a New Imaging System for the Coronal Green-Line at Norikura

Motokazu NOGUCHI, Kiyoshi ICHIMOTO, Nobuyuki TANAKA, Kazuyoshi KUMAGAI,
Kazuya SHINODA, Yohei NISHINO, Yoshihiro KATO, Takashi SAKURAI,
Tetsuo NISHINO, Takeo FUKUDA, and Norihide TAKEYAMA*

Abstract

A new imaging system for the coronal green line Fe XIV 5303Å was constructed at the Norikura Solar Observatory. The system consists of a 10 cm coronagraph, a tunable Lyot filter, and a cooled CCD camera. The transmission curve of the Lyot filter can be modulated by two liquid crystal variable retarders equipped in the filter and this provides quick wavelength tuning and efficient subtraction of sky background. Two-dimensional distributions of the intensity and Doppler shift of the coronal green line can be obtained within 30 seconds with accuracies of better than $10^{-6} I_{\odot}$ and 1 km s^{-1} . Regular operation was started in 1997 September. The aim of the new system is to investigate plasma motions associated with the magnetic field reconnection and waves in the solar corona.

1. はじめに

乗鞍コロナ観測所は1949年に開所し、10 cm コロナグラフ [対物レンズ有効口径 100 mm, 焦点距離 1490 mm (5303Å), 日本光学] に直視分光器 [40Å/mm (5303Å), 日本光学] を取り付け、眼視により太陽全周のコロナ緑色輝線 (Fe XIV 5303Å) の分光強度観測を続け、観測結果は Quarterly Bulletin on Solar Activity に報告されてきた¹⁾。しかし直視分光観測から得られるデータは太陽周辺の72点における輝線強度のみで、短時間で変動する現象のメカニズムを研究することは不可能であった。このため直視分光器に替わりコロナの2次元輝線強度分布、速度場を短時間に撮る観測装置の開発を進め、1996年11月に新コロナ輝線観測装置が完成して10 cm コロナグラフに取り付け試験観測を開始し、1997年、開所以来続けてきた直視分光器によるコロナ緑色輝線の眼視観測は終了した²⁾。新コロナ輝線観測装

置は乗鞍に因み NOGIS (NOrikura Green-line Imaging System) と名称し、1997年9月には定常観測を開始した。その後、数度に渡る光学系の手直しを行って最近観測データが安定し、コロナ現象を研究する上で興味ある現象が撮られつつある。NOGISによる重要な目的は、(1) コロナの波動を捉える: コロナの中の波動はエネルギーを運ぶだけでなく、擾乱を遠くに伝えるなど、コロナのダイナミクスにおいて重要な役割を果たすと考えられているが、研究はされたものの存在は良くわかっていなかった。コロナの速度場を精密に測ることにより伝搬する波動の証拠を見つける。(2) 磁気リコネクションモデルを検証する: 太陽コロナで繰り返される様々な活動現象を説明する最も有力な考え方は、磁力線のつながり変え (リコネクション) によって磁場のエネルギーを開放する、というもので、その時発生しているはずのガスの激しい流れを捉え、磁気リコネクションモデルの正否を検証する、というものである。

* 株式会社ジェネシア (Genesia Corporation)

2. 光学系概要

NOGIS は 1 節で述べた研究目的を達成するためコロナ緑色輝線と H_{α} (6563Å) の二波長観測ができる。コロナ緑色輝線の観測は、開発した 5303Å リオフィルターと冷却 CCD カメラで撮像し、プロミネンスなどを対象にした H_{α} 観測は 6563Å 多層膜干渉フィルターと写真カメラで撮像を行う。コロナの研究には長時間にわたりコロナを高精度で安定して観測できる事が重要で、このためオッカルティングディスクと太陽光球のズレをたえず補正する自動光電ガイド装置 (2 軸ステージ付) を開発した。NOGIS を 10 cm コロナグラフに取り付ける際の空間スペースに制約があることなどを考慮して設計を行い、従来の直視分光器を取り付けた全長とほぼ同寸法になった³⁾。



図 1. NOGIS.

図 1 は 10 cm コロナグラフに取り付けられた NOGIS である。図 2 は NOGIS の光学系で、システムが完成すると 5303Å コロナ緑色輝線観測は冷却 CCD カメラ 2 台、 H_{α} 観測は写真カメラ、ガイド CCD カメラで観測を行うが、コロナ緑色輝線観測は現在冷却 CCD カメラ 1 のみで行なっている。筐体の構成はオッカルティングディスクを同架する自動光電ガイド装置、対物レンズの汚れを監視する散乱光モニター装置、コリメータレンズが一体化した鏡筒部と、リオフィルターを内蔵し撮像系ごとのカメラを同架する箱筐体からなり、空間スペースの制約から、装置の全長を短くするため 5303Å 光学系は光路を振り分けて主光軸と平行に対物レンズ方向へ折り返す光学系にし、 H_{α} 光学系と箱筐体に納めた。鏡筒部と箱筐体はトラスで繋がる構造である。トラス構造を採用したのは、①コリメータレンズでコリメートした光束は、各カメラ系への入射光束自体は筐体が自重で平行移動しても像の崩れはない。②自重によって発生する撓みの除去、などのためである。設計段階での構造解析の結果、鏡筒部にトラスで繋がった箱筐体の平行移動量は極僅かであり、各カメラごとの結像性能に影響を及ぼさないことがわかった⁴⁾。

対物レンズで形成された太陽像はオッカルティングディスク上に焦点を結び、ディスクによって太陽光球が隠される。太陽は季節によって視直径が変化するため、ディスク口径 14.125 mm から 14.806 mm まで 15 枚を太陽視直径の変化に合わせて交換している。オッカルティングディスクはレンズホルダーに納めたフィールドレンズと一体化したディスク支持棒に円錐 (太陽光熱除

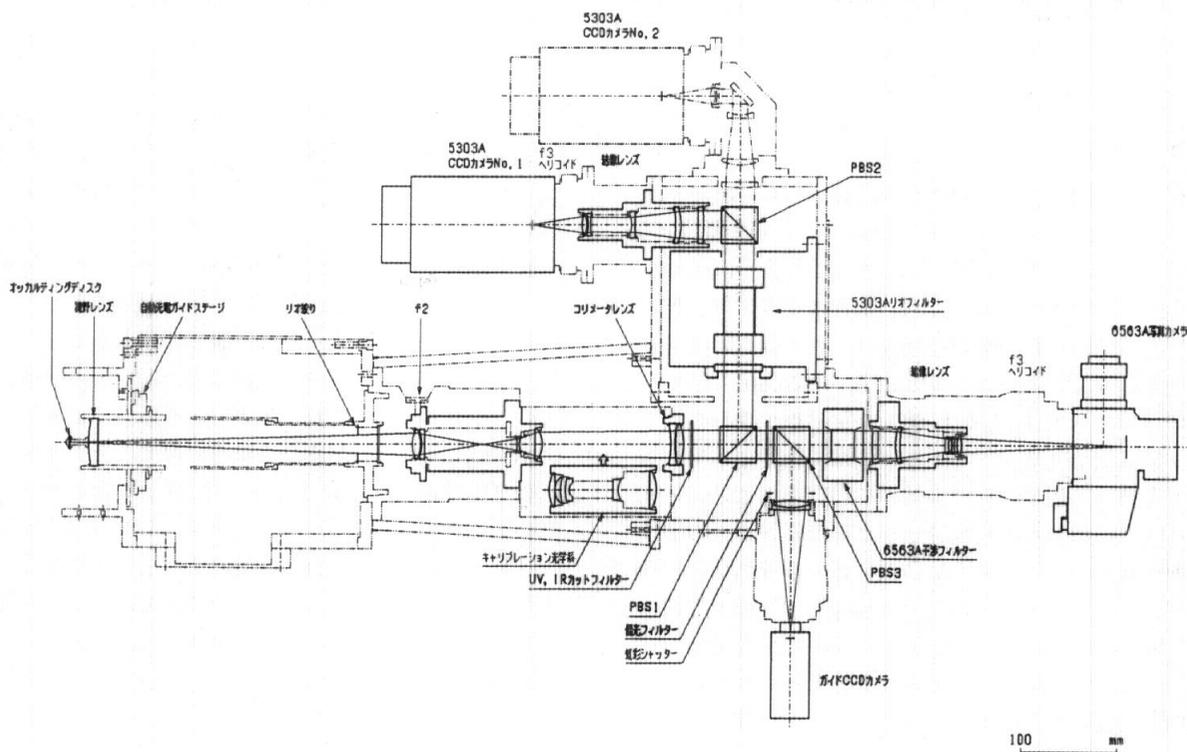


図 2. NOGIS 光学系.

表 1. 撮像光学系基本諸元.

波長	5303Å (Fe XIV)	6563Å (H _α)
視野角 (in the sky)	0.707° × 0.707° (対角 1.00°)	
ディテクタ	CCD チップ: TC125 (Texas Instruments) チップサイズ: 12 mm × 12 mm (対角 17.0 mm) ピクセル数: 1024 × 1024 ピクセルサイズ: 12 μm × 12 μm	写真フィルム: TYPE135 有効サイズ: 22.1 mm × 22.1 mm (対角 31.2 mm)
カメラ	MCD1200 (Spectra Source) 12 bit (200 KHz) -30°C 冷却	ニコン F3 カメラ 250 枚撮モータードライブ
合成焦点距離	970 mm	1800 mm
スケール	213.1 arcsec/mm	115.4 arcsec/mm

表 2. ガイド光学系基本諸元.

ガイド系結像レンズ	メレスグリオ製アクロマートレンズ 品番: 01LA0145
視野角 (in the sky)	0.726° × 0.726° (対角 1.12°)
カメラ	SONY 2/3" CCD カメラ 型名: XC-77
合成焦点距離	520.6 mm
スケール	396 arcsec/mm

去) とともに取り付け、バヨネットマウントを介してレンズホルダーごと自動光電ガイドステージ (以下自動ガイドステージ) に取り付ける。

自動ガイドステージは、ガイド CCD カメラからの画像信号をパーソナルコンピューターによって処理、制御するシステムで、望遠鏡の追尾誤差、撓みによって発生する光軸の傾きなどに起因する太陽光球とオクカルティングディスクのズレ (太陽光球はオクカルティングディスクに隠されて見えない) を、オクカルティングディスク周縁散乱光輝度の傾きから計測し、太陽に対しオクカルティングディスクを絶えず補正して合致させるシステムである。ガイド CCD カメラ直前には入射光量を制御するための虹彩シャッター (開口口径 35 mm) が取り付けられ、虹彩シャッターは光量に合わせて開口径が自動制御される。パーソナルコンピューター制御によるステージの最大移動量は X, Y 両軸共ステージ機械軸中心から ±1.5 mm で、この設定値で制御を止める理由は、対物レンズ光軸に対しフィールドレンズを追従させた場合、光軸中心から 1.5 mm を超えるとコマ収差が急激に増長し像を悪化させるためである。設定値に達するとマイクロスイッチで自動制御を停止する。最悪、自動制御が不能に陥り限界を超えて暴走した場合、ステージ機械軸中心から 3 mm の位置にモーター電源を強制的に切るリミットスイッチを設け、ステージを暴走による衝突から回避する停止機構を設けてある。自動ガイドステージはパーソナルコンピューター制御を切り離し、ハンドセットボックス操作によって任意にステージを動かすこともできる。

フィールドレンズにより形成された瞳像にはリオ絞りが

がおかれ、回折光を除去する。リオ絞りの開口口径は 18.6 mm である。コリメータレンズでコリメートした光束はリオフィルターの中心に瞳像を形成する。UV, IR カットフィルターで紫外光、赤外光を除去するが、表面反射を低減するため 2 枚のフィルターを光学油 (Dow Corning Q2-3067) で貼り合わせ、加圧形成し一体化してある。PBS-1 (偏光ビームスプリッター) でコロナ輝線撮像系へ振り分け、透過光は PBS-3 で H_α 撮像系とガイド CCD カメラへ光路を振り分ける。

コロナ緑色輝線観測はリオフィルターで 5303Å 波長域の光を選択し、PBS-2 で冷却 CCD カメラ 1 と 2 に振り分け撮像する。冷却 CCD カメラ 1 と 2 にはリオフィルターの異なる透過波長が行き、その波長は LCVR (液晶遅延素子、後述) で制御することが可能で、冷却 CCD カメラ 1 でコロナ、2 でスカイ (あるいは逆) を同時に撮像しガイドエラーによるノイズを低減する。ただし現在は冷却 CCD カメラ 1 のみで観測を行っている。冷却 CCD カメラは MCD1200 (Spectra Source) で撮像面積 12 × 12 mm、ピクセル数 1024 × 1024、視野は 47' × 47' である。

H_α 観測はコリメートした光束が PBS-1, PBS-3 を透過し、6563Å 干渉フィルター (透過波長半値幅 0.45Å) で H_α 波長域の光が透過して写真カメラで撮像を行う。カメラは 250 枚撮モータードライブ付 (ニコン) でパーソナルコンピューター制御によりシャッター速度が 1/60 秒から 1 秒まで 7 段階連続して撮像する⁹⁾。写真カメラ有効撮像面積は 22 × 22 mm で、視野は 43' × 43' である。ガイド CCD カメラは XC-77 (ソニー) で、撮像面積は 6.6 × 8.8 mm、視野は 44' × 58' である。表 1 に撮像

光学系、表2にガイド光学系の基本緒元を示す。

10 cm コロナグラフ対物レンズは平凸単レンズで材質はBK-7、口径120 mm (有効口径100 mm)、焦点距離は波長5303Åでは1490 mmである。NOGISはコロナ緑色輝線観測、H α 観測とも対物レンズ1つで行うためレンズの色収差によって観測波長5303Åと6563Åでは焦点距離が違う。オッカルティングディスクにおけるフォーカスは波長5303Åに合わせてあり、太陽光球はオッカルティングディスクに隠されて見えないが、H α では、オッカルティングディスクから僅かにはみ出した像になる。しかし6563Å多層膜干渉フィルターの透過波長半値幅が狭いためプロミネンスを観測するには支障がない。用いた多層膜干渉フィルターは設定温度48°C (温度制御器ポテンショメーター設定値2.49)で透過中心波長6562.8Åになる。

オッカルティングディスクに対する太陽像のフォーカス調整はコロナグラフ鏡筒の通称f1ハンドルによって行い、オッカルティングディスク以後の光学系すべてを軸方向に移動する。冷却CCDカメラにおけるオッカルティングディスクのフォーカス調整はリレーレンズ系f2ハンドルの調整で行っている。各カメラ間の相対的なフォーカスずれはカメラ移動用のf3ハンドルで修正を行い、すべてのカメラで最良像が得られる。

コロナグラフでは対物レンズ表面に付着した汚れは散乱光を増長し、コロナ輝線が見えにくくなるため常に汚れの少ないレンズであることが必須である。このためリオ絞り後部のリレーレンズ部にキャリブレーション光学系(1軸ステージ付)が内蔵され、観測前に挿入して対物

レンズの像をCCD上に結び撮像している。これにより対物レンズ汚れによる散乱光レベルをモニターすることが可能となる。汚れの度合いが増した場合、対物レンズをレンズセルごと鏡筒から取り外して清掃を行う。

これらNOGIS光学系、レンズホルダーはすべて(株)ジェネシアで設計し製造された。

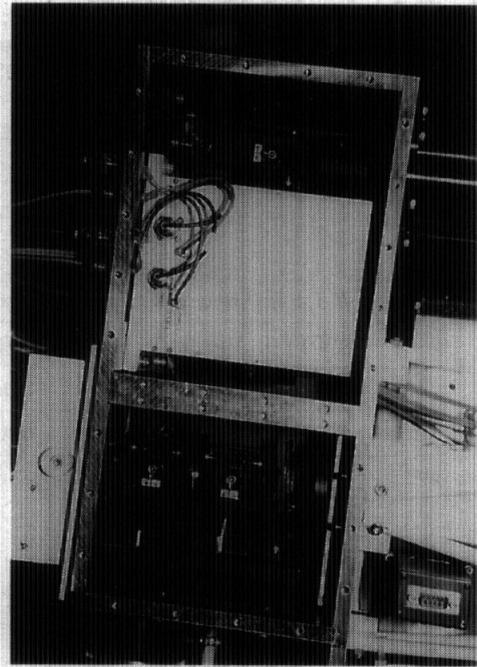


図3. 筐体内部。
(上) リオフィルターとPBS-2
(下) PBS-1とPBS-3

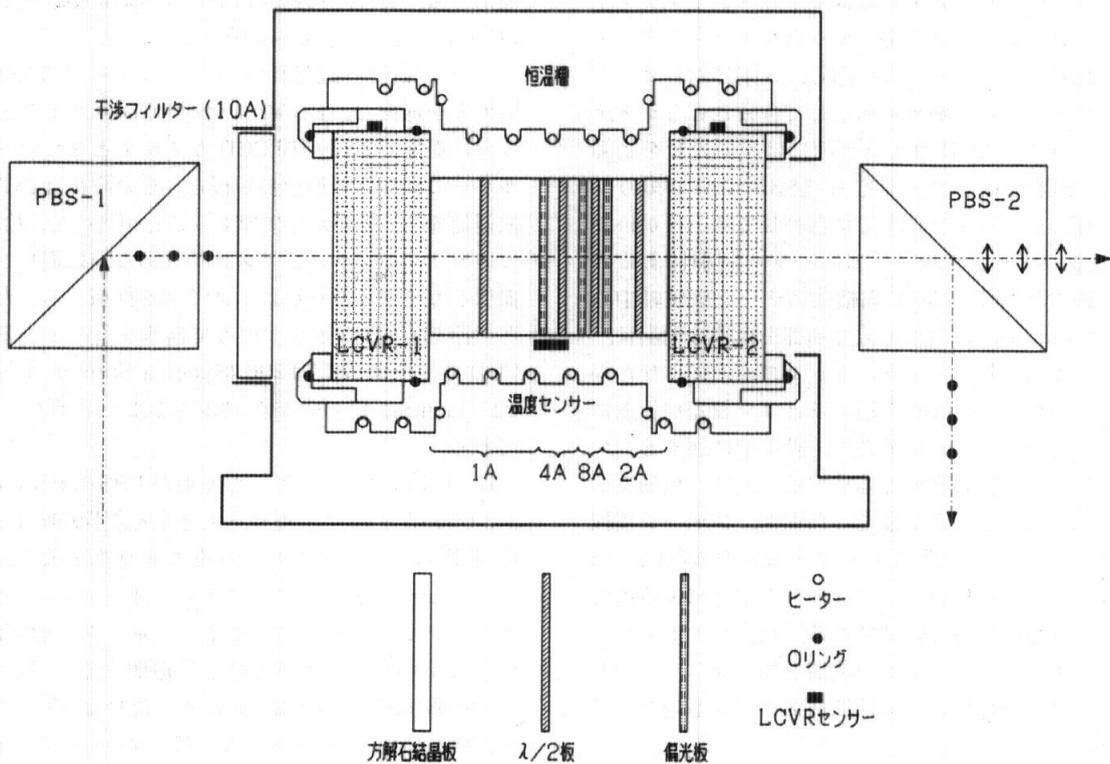


図4. リオフィルターの構成。

3. リオフィルター

コロナの輝度を定量的に、また、コントラストよく求めるためにはコロナ緑色輝線と散乱光を効率よく分離して観測することが重要である。また 10 cm コロナグラフに取り付ける前提から観測装置小型化は必須であり、このため新たに 5303Å リオフィルターを開発した。開発したリオフィルターは、従来から乗鞍コロナ観測所で使われている 5303Å リオフィルター（透過波長半値幅 0.5Å, Halle）に比べて全長、重量とも半分以下の大きさである⁶⁾。図 3 は箱体内の機器で、筐体は 2 層に別れ、上層の白く輝いているのがリオフィルターで、リオフィルター上部が PBS-2、下層に PBS-1, 3 が見えている。図 4 にリオフィルターの構成を示す。複屈折フィルターは極めて狭い波長域の単色光を通す特性を持ち、考案したフランスのリオに因みリオフィルターと呼ばれている。製作したリオフィルターの複屈折素子は 4 つの方解石ブロック、3 枚の偏光板で構成され寸法は 32×32×48.6 mm、有効口径 30 mm で中国・南京天文儀器研制中心で研磨製作した。リオフィルターで使われる方解石のような複屈折結晶は、光学軸に垂直な偏光と平行する偏光では屈折率が異なる特性を持っている。この特性を利用し、偏光面が 45° の偏光板で方解石平行板を挟むと、光の波長透過曲線は周期的な透過率をもった形が得られる。この周期波長の間隔は方解石平行板の厚みと直行する 2 偏光の屈折率の差で決まり、方解石平行板の厚み比 2 のブロックを重ねると、全体の透過波長曲線は各ブロックの積となり、狭い波長域の光のみ透過できる⁷⁾。それぞれの方解石平行板の厚み比は 1:2:4:8 になっており、透過波長の周期は 1, 2, 4, 8Å である。各方解石ブロックは $\lambda/2$ 波長板を 2 枚の方解石エレメントでサンドイッチした構成をしており、入射角に対する波長依存性を低減している。透過中心波長を連続して変化させるために液晶遅延素子 LCVR (liquid-crystal variable retarder: Meadowlark Optics) を組み込んだ。LCVR の原理は、ネマティック液晶と呼ばれる棒状の分子の液晶を、細い溝を切った 2 枚のガラス基板で挟み、分子の向きをガラス基板と平行に並べ、酸化インジウムの透明電極を両面に着ける。ここに高周波電圧 (2 kHz) をかけることによって液晶分子の配向を変える。この配向の度合いによって LCVR の複屈折が変化する。液晶分子の動きは電圧依存の他に温度依存性もあるため、温度センサーを取り付け常時温度をモニターし、電圧値を調整して必要とする遅延量を得る⁸⁾。LCVR の 5303Å での遅延範囲は -180° から 360° で、調整電圧の範囲は 1 から 10 V である。LCVR-1, 2 は光学油 (Dow Corning Q2-3067) で方解石平行板に密着して一体構造になっており、LCVR-1, 2 は方解石平行板の光学軸に対して 45° 傾けて貼り合わせてある。両 LCVR の方解石平行板光学軸に対する取り付け精度は 0.5° 以内である。LCVR の遅延制御はパーソナルコンピューターで行い、遅延量は

任意に替えることができる。LCVR-1 の前に 5303Å 多層膜干渉フィルター（透過波長半値幅 10Å, 透過率 73%: Andover Corp.）が挿入され透過波長幅を狭める。複屈折素子、LCVR とも恒温槽に納め、周囲を保温材で覆い恒温と放熱を防ぐ構造である。

リオフィルター入射窓、出射窓に取り付けられた偏光ビームスプリッター PBS-1, 2 は偏光板の役目をし、リオフィルターと一体化して構成され、将来はリオフィルター LCVR の遅延を制御して冷却 CCD カメラ 2 つで透過波長の違う画像を交互に取得するためである。

リオフィルターは温度 40.6°C で透過中心波長 5302.9 Å になり、透過波長幅は 1Å である。高温槽は 40.6°C ± 0.1°C 以内に保たれている。リオフィルターの温度制御は温度コントローラー [デジタル指示調節計 DB1230-0000 (チノー)] で行い、温度制御方法は PID 定数を設定し自動で行ない、恒温筒に内蔵した温度センサー（白金センサー pt100）からの情報により恒温用ヒーターの印加電圧を制御している。恒温筒の周囲は保温シート材を多層巻きし、外周を真鍮板で覆い外部パネルからの冷熱を遮る構造である。恒温用のヒーターは乗鞍の温度環境と円筒恒温筒に巻き付けるため 200 W のシリコンチューブヒーター（直径 3 mm）を使用している。温度コントローラー筐体に内蔵したヒーター電源 (DC24V 出力) は、故障を考慮し外部電源に切り替えることができる。開発したリオフィルター筐体寸法は 150×150×150 mm の立方体で重量は 3 kg と小型である。複屈折素子を除くリオフィルター筐体は天文機器開発実験セン

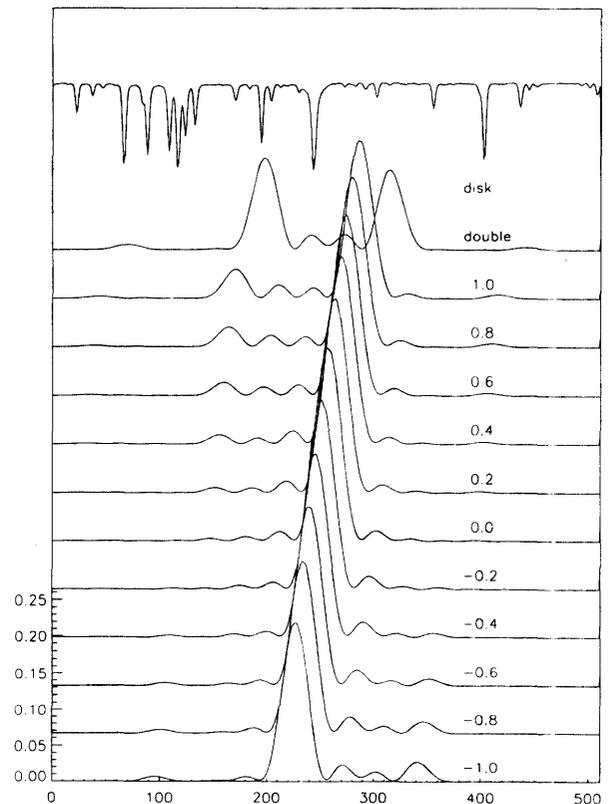


図 5. リオフィルター LCVR 遅延による透過曲線の変化。

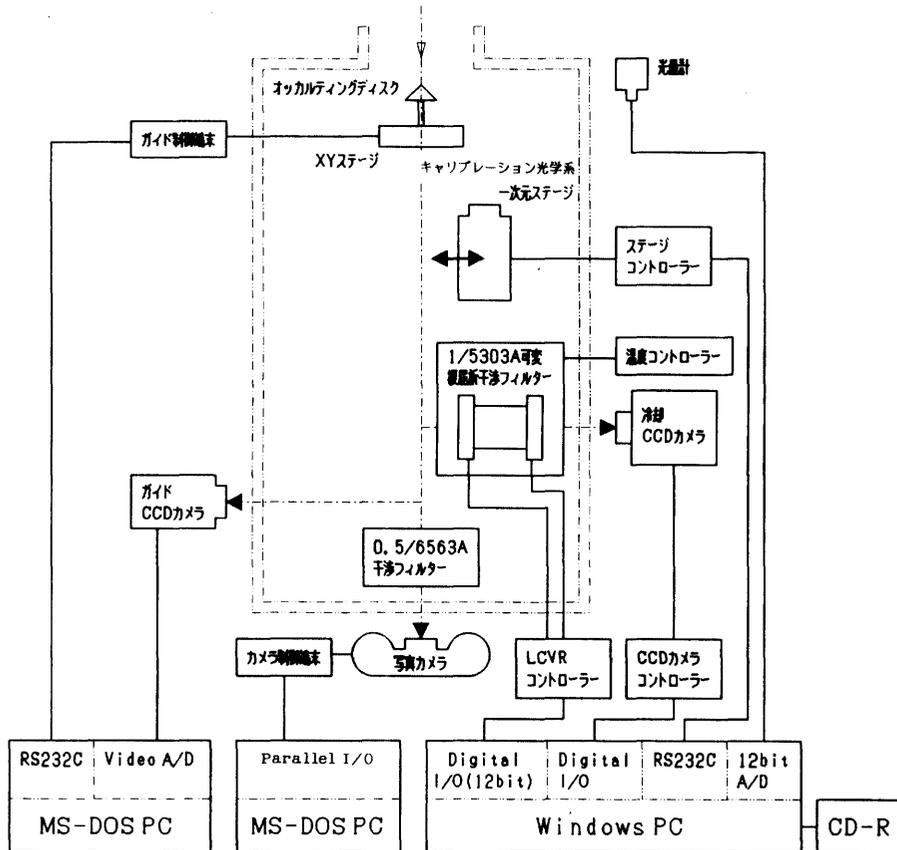


図6. NOGIS 制御システム。

ター・マシンショップで開発した。

図5は25 cm コロナグラフ分光器を使ってLCVR-1, 2の遅延量を周期的透過曲線が 0.2\AA で変化させた時のリオフィルター透過曲線の変化を示したもので、図左の数値は透過率(%), 上部が太陽光スペクトルで中央のピークが 5303\AA コロナ緑色輝線である。透過曲線上の数値は透過中心波長を示し、範囲は -1.0\AA から $+1.0\text{\AA}$ である。LCVR-1, 2の遅延量をそれぞれ 0° : 0° の場合 5303\AA シングルピーク, 0° : 180° で 2\AA 周期の透過曲線のみ半周期ずれてダブルピークとなる。リオフィルターの透過率は直線偏光に対して約22%である。図からLCVRの各遅延変化ごとの透過曲線は、透過中心波長(0.0)に対し長波長側, 短波長側とも透過曲線の傾きが一樣に並び、LCVRの遅延制御が正確に行われていることがわかる。

4. 制御システム

図6はNOGISの制御システムで、パーソナルコンピュータによる制御はコロナ輝線撮像系, 自動ガイドステージ制御, H_α 写真カメラ制御に分類される。

コロナ緑色輝線観測関係はWindows PCで行い、冷却CCDカメラ制御, リオフィルターLCVR制御, 対物レンズ散乱光モニター用キャリブレーション装置制御, 光量計からの輝度情報である。光量計は10 cm コロナグラフ光軸と平行に対物レンズ付近に取り付けられており、太陽光球からの輝度情報を基準にコロナ緑色輝線

データの較正をするためのものである。光量計の構成は対物レンズ(有効口径50 mm, 焦点距離250 mm)前面に 5303\AA 多層膜干渉フィルター(透過波長半値幅 60\AA)とVG-50フィルターを組み合わせ、コロナ緑色輝線と太陽光球輝線を同じにしてある⁹⁾。太陽の輝度情報を得る光量センサーS1133(浜松ホトニクス)からの信号は、電流-電圧変換バッファリング後パーソナルコンピュータに送る。

自動ガイドステージ制御はガイドCCDカメラの画像信号を元に、オッカルティングディスクを太陽にたえず合致させるシステムで画像情報, ステージ制御ともパーソナルコンピュータで行う。

NOGISは通常観測時はリオフィルターの4つの透過曲線(図7)で行っている。図の上部は太陽スペクトル, 下部はリオフィルターの透過曲線である。観測はコロナ輝線中心(single peak), $\pm 2\text{\AA}$ のdouble peak, -0.45\AA , $+0.45\text{\AA}$ のセットでコロナの撮像を行い、各露出時間は散乱光輝度に依存し平均1~2秒である。この4つの画像を1セットとするが、S/Nを高めるため4セット加算している。観測は最初に全面画像を取り込み、モニターTV画面上でコロナ現象の活動的部分領域を切り出す。部分領域の設定は2箇所まででき、領域の範囲指定は自由である。コロナデータの処理はIDL(Interactive Data Language: Research System Inc.)上で行い、平均1分以内で部分のコロナ輝線画像が得られる。通常の観測では、部分画像を20回撮るごとに全体画像を撮

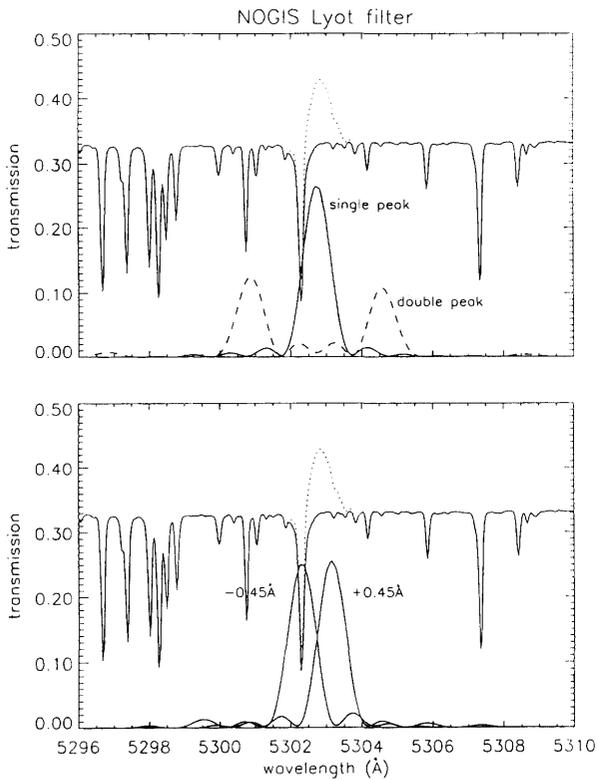


図7. 観測時のリオフィルター透過曲線。
 (上) single peak と double peak
 (下) $\pm 0.45\text{\AA}$ の透過曲線

り、40回ごとにダーク画像を取得しているが、これらは観測目的に応じて変更可能である。

5. NOGIS の測定原理

NOGIS で得られる強度は、リオフィルターの透過プロファイルを $T_k(\lambda)$ として

$$I_k = \int \{I_{\text{sky}}(\lambda) + I_{5303}(v, \lambda)\} \cdot T_k(\lambda) d\lambda = S_k + E_k$$

と書くことができる。ここで $I_{\text{sky}}(\lambda)$ と $I_{5303}(v, \lambda)$ は、スカイにおける散乱光および速度 V だけドップラーシフトしたコロナ輝線のスペクトルであり、 k はリオフィルターのモードをあらわす。

S_k, E_k は散乱光および輝線の寄与分である。NOGIS は通常観測においてリオフィルターの4つの透過プロファイル、輝線中心、 $\pm 2\text{\AA}$ のダブルピーク、 -0.45\AA 、 $+0.45\text{\AA}$ でコロナの撮像を行っている。1セットで得られる4つの強度 ($I_0, I_{\pm 2}, I_{-0.45}, I_{+0.45}$) は次のように表せる。

$$\begin{aligned} I_0 &= S_0 + E_0 \\ I_{\pm 2} &= S_{\pm 2} \\ I_{-0.45} &= S_{-0.45} + E_{-0.45} \\ I_{+0.45} &= S_{+0.45} + E_{+0.45} \end{aligned}$$

ここで、 $I_{\pm 2}$ には輝線の寄与がないことを仮定した。 $S_0/S_{\pm 2} = r_0$ 、 $S_{-0.45}/S_{\pm 2} = r_-$ 、 $S_{+0.45}/S_{\pm 2} = r_+$ は散乱光レベルによらない定数と考えられ、これらは25 cm コロナグラフ分光器で測ったフィルターの透過曲線と散乱光ス

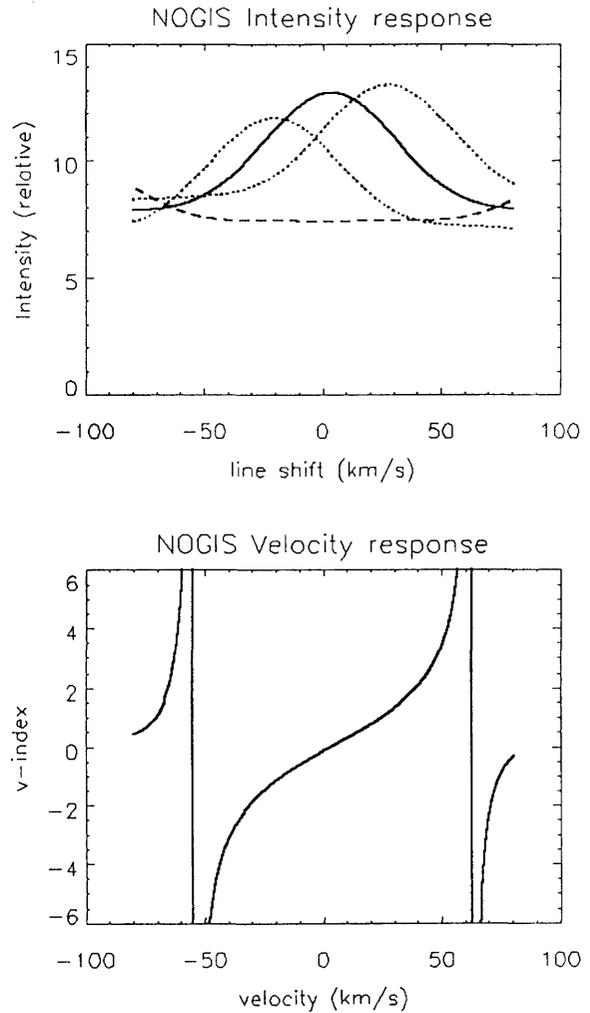


図8. (上) コロナ輝線の波長シフト量に対する4つのモードで得られる強度変化
 (下) コロナ輝線の波長シフト量に対する速度指数の変化

ベクトルから求めることができる。結果は

$$\begin{aligned} r_0 &= 1.074 \\ r_- &= 0.963 \\ r_+ &= 1.153 \end{aligned}$$

であった。輝線強度の指数を

$$I'_{5303} = (E_0 + E_{-0.45} + E_{+0.45}) / 3$$

とする。上の式から、

$$I_{5303} = (I_0 + I_{-0.45} + I_{+0.45}) / 3 - (r_0 + r_- + r_+) \cdot I_{\pm 2}$$

となり、4つの観測量から輝線強度指数を求めることができる。

一方、コロナ輝線がドップラーシフトすると4つの強度が相対的にシフトする。波長シフト量と4つの強度の関係は、輝線輪郭を仮定することで計算することができる。ここでは、輝線輪郭として25 cm コロナグラフの観測から、強度が $1/e$ になる幅が 0.48\AA のガウシアンを仮定し、輝線の波長シフトに対するNOGIS各出力を計算した¹⁰⁾。輝線ピーク強度が散乱光レベルと等しい場合の結果を図8上に示す。ドップラーシフトの速度指数は次式で与える。

$$V'_{5303} = (E_{+0.45} - E_{-0.45}) / I'_{5303}$$

$$= (I_{+0.45} - I_{-0.45} - (r_+ - r_-) \cdot I_{\pm 2}) / I'_{5303}$$

図8下は、実際に与えた輝線シフト量(V'_{5303})と速度指数の関係を示したもので、これより速度が小さいときに次の関係が得られる。

$$V_{5303} = 22.89 \times V'_{5303} \text{ (km s}^{-1}\text{)}$$

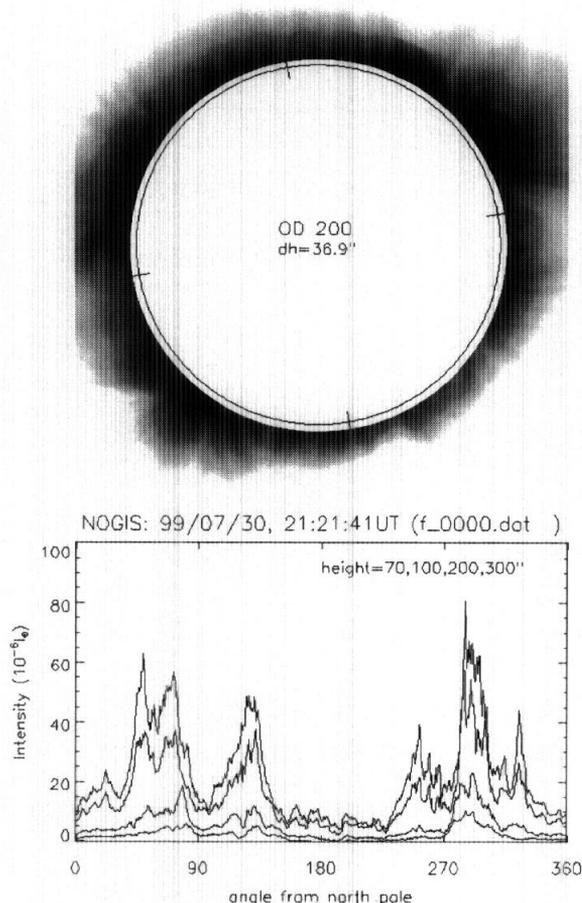


図9. (上) コロナ緑色輝線全面画像
(下) 太陽光球から 70", 100", 200", 300" の高さのコロナ強度

また、図下より NOGIS の視線速度に対する感度は $\pm 50 \text{ km s}^{-1}$ あたりで飽和することがわかる¹¹⁾。

6. 観測例

図9に NOGIS の観測例を示す。図上がコロナ緑色輝線の全面画像で、白円がオッカリングディスク径を示し、全周に沿って筋状に拡がっているのがコロナである。内側の黒円線は太陽光球を示しており、黒円線上4つの短線が太陽の方位軸を示し、上が北、左が東である。西北西と北西領域にコロナの強い箇所が現れており、西北西のコロナにはループ構造が強く現れ、北西のコロナはループ構造は顕著でないが舌状の面白い形をしている。1画像の露出時間は4秒である。図下はコロナ画像データを処理してコロナ緑色輝線強度を表したもので、それぞれ太陽光球から 70", 100", 200", 300" の高さにおける強度図で、高いグラフが 70", 一番低いグラフが 300" における強度である。図から太陽近傍ほどコロナ強度は高く、太陽周縁のコロナ強度の振る舞いがわかる。1997年まで行われた直視分光器の観測では、太陽周縁高 50" におけるコロナ緑色輝線強度を 5度角間隔 72点のデータしか得られず、NOGISの観測は情報量が飛躍的に増えた。

図10は、図9のコロナ画像の強度が特に強い西北西の領域を切り出した部分画像で、図左が 5303Å コロナ輝線画像、右が速度場画像である。輝線画像にコロナの複雑なループ構造がわかるが、輝線の速度場観測をすると、コロナは複雑な振動運動をしていることがわかる。

7. まとめ

NOGISは1997年9月に定常観測を開始して以来コロナの速度場研究において有意な現象を多数捉えている。しかしコロナ輝線観測は1つの冷却 CCD カメラのみで撮像を行っており、自動ステージで太陽とオッカリングディスクを合致しても散乱光成分の除去は完全ではなく、2節で述べた冷却 CCD カメラ 2つを同時に



図10. コロナ緑色輝線全面画像から選択した部分画像。
(左) コロナ輝線画像、(右) 速度場画像

使ってガイドエラー、シーイングの影響を受けないシステム構築が待たれる。また H α 観測も写真フィルムの量子効率の悪さ、フィルム現像の手間を考えると冷却 CCD カメラシステムに変更し、コロナ輝線観測と同時観測することにより彩層で発生する現象がコロナに与えるメカニズムをより研究しやすくなる。

現在、リオフィルターの波長検定は定期的に NOGIS から取り外し、25 cm コロナグラフ分光器で検定しているが、取り外すことによりリオフィルターの再現性が変わる問題があり、NOGIS に取り付けた状態で波長検定ができるよう小型分光器を 10 cm コロナグラフの付近に設置し、光ファイバーを使って光を分光器に導いて検定することを考えている。

謝辞

NOGIS の開発にあたり小型のリオフィルターは必須であり、小型複屈折素子を研磨製作していただいた南京天文儀器研制中心の李挺博士、自動光電ガイド装置の 2 軸ステージの基礎設計を担った岡本富三氏（元国立天文台助教授）、リオフィルターの温度制御で電気回路設計に関して教示していただいた宮崎英昭氏（元国立天文台助教授）に感謝します。

NOGIS 完成後も観測データが安定するまで時間を要したが、この間乗鞍コロナ観測所チームの皆様には構想当初から色々アドバイスを戴き、完成後も調整を含み多岐に渡ってご協力をいただき深謝いたします。

参考文献

- 1) 乗鞍コロナ観測所 40 年誌, 国立天文台 (1990).
- 2) T. Sakurai, M. Irie, H. Imai, H. Miyazaki, and J. Sykora: Emission Line Intensities of the Corona

- and Sky Brightness Observed at Norikura: 1950–1997, *Publ. National Astron. Obs. Japan*, **5**, 121–137 (1999).
- 3) 野口本和, 一本 潔, 田中伸幸, 篠田一也, 熊谷收可, 加藤偵博, 西野徹雄, 福田武夫, 武山芸英, 乗鞍コロナ観測所チーム: 乗鞍 10 cm コロナグラフ偏光撮像計画, 偏光による太陽プラズマの診断ワークショップ集録, 国立天文台, 77–84 (1996).
 - 4) 山下泰正: 反射望遠鏡, 東京大学出版会 (1992).
 - 5) 熊谷收可: 太陽コロナ, 紅炎単色像の撮影装置, 東京天文台報, **19**, 288–294 (1980).
 - 6) 今井英樹, 西野洋平, 篠田一也, 一本 潔: リオフィルターによる 5303Å コロナ輝線撮像システム, 国立天文台報, **19**, 157–162 (1999).
 - 7) 清水一郎: 太陽観測, 恒星社 (1983).
 - 8) 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, 国立天文台, 1–9 (1996).
 - 9) 宮崎英昭, 岡本富三, 福島英雄: コロナ緑色輝線測光方法の改良, 東京天文台報, **19**, 532–536 (1981).
 - 10) J. Singh, K. Ichimoto, H. Imai, T. Sakurai, and A. Takeda: Spectroscopic Studies of the Solar Corona I. Spatial Variations in Line Parameters for Green and Red Coronal Lines, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **51**, 269–276 (1999).
 - 11) K. Ichimoto, M. Noguchi, N. Tanaka, K. Kumagai, K. Shinoda, T. Nishino, T. Fukuda, T. Sakurai, and N. Takeyama: A New Imaging System of the Corona at Norikura, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **51**, 383–391 (1999).