

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.5-1

ドームレス太陽望遠鏡水平分光器
回折格子自動制御システム
PC-based Grating Control System for the
Horizontal Spectrogram of the Domeless
Solar Telescope

川手 朋子 ^{*1}、Denis P. Cabezas ^{*2}、一本 潔 ^{*2}、上野 悟 ^{*2}

2020年 9月 30日 初稿

^{*1}自然科学研究機構核融合科学研究所

^{*2}京都大学理学研究科附属天文台

ドームレス太陽望遠鏡水平分光器 回折格子自動制御システム

PC-based Grating Control System for the Horizontal Spectrogram of the Domeless Solar Telescope

川手 朋子、Denis P. Cabezas、一本 潔、上野 悟

概要

本研究では、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡水平分光器において新たに開発した回折格子自動制御システムについて報告する。ハードウェアとしてデジタル IO、フォトカプラ回路、組端子台からなるモジュールを製作し、制御盤 HDB を経由せずに観測 PC から Carl Zeiss 製ドームレス太陽望遠鏡全体制御盤へと信号を送受信することが可能となった。ソフトウェアとして Windows 用デジタル IO 送受信ライブラリおよび IDL プロシージャ群を開発した。これらからなるシステムにより、観測 PC から使用する回折格子番号および波長を入力すると、選択された回折格子に対し回折格子角度を駆動させ、所定のカメラに目標波長を導入することが可能となった。本システムを用いた際の波長精度は、主として回折格子角度指令値の分解能(1 分角)で決まり、3つの回折格子に対して $8x(\text{回折次数})\text{\AA}$ 以下程度であった。本システムを用いて取得した水平分光器による太陽スペクトルアトラスについても紹介する。

This report introduces a newly developed grating control system installed on the horizontal spectrogram of the Domeless Solar Telescope at the Hida Observatory. The hardware system consists of a digital IO device and an opto-coupler circuit that connect an observation PC and the telescope control rack made by Carl Zeiss. The software system consists of libraries to handle digital IO for Windows OS and IDL procedures. By using the system, when a wavelength and a grating number are commanded in the observation PC, the grating is selected and set to adjust the commanded wavelength. The accuracy of the central wavelength set by this system with respect to the commanded wavelength is better than $8 \times (\text{diffraction order}) \text{\AA}$ for three gratings. We show a solar spectral atlas covering the wavelength range of 3500-11000 \AA obtained by using this system.

1. 序論

太陽の高分散可視光スペクトル線は光球～彩層の大気構造を知るための基礎データである。昨今の数値シミュレーションではスペクトル線の微細構造を模擬しており、また恒星大気

構造の推定においても太陽の領域別のスペクトルが参照される。しかしこれまでの問題点として、一般に参照できる広帯域・高波長分解観測データは平均スペクトルや静穏領域のスペクトルに限られており、領域別のシミュレーションとの比較や、活動領域の状態を推定した太陽-恒星スペクトルの観測における比較が進んでいない。

ドームレス太陽望遠鏡(DST[1])は世界でも有数の高分散ツェルニー・ターナ型分光器を有しており、広帯域・高波長分解観測に対して最適である。これまで DST 分光器は各観測時にカメラ位置と回折格子角度を固定し、特定の波長の詳細観測を行ってきた。一方広い波長範囲の取得には波長スキャン機能が必要となり、回折格子角度を都度変更しながらの観測となる。DST の回折格子角度設定はディップスイッチによる手動設定であり、また角度と波長との対応づけは別途計算が必要である。したがってリアルタイムの波長スキャン観測は困難であった。

本研究において、我々は DST 水平分光器回折格子角度の PC 制御環境を新たに構築した。本技報では開発した制御システムおよび使用例について解説する。

2 章では DST における回折格子角度の制御構造について述べる。3 章では新たに開発した PC による制御のためのハードおよびソフトウェアについて解説する。4 章では本システムを用いた際の、目標波長に対する視野の中心に到着した波長の誤差について記述する。5 章では自動化した角度制御機能を用いた観測例として、近紫外～可視～近赤外スペクトルの観測について紹介する。6 章で本研究のまとめを述べる。

2. DST 水平分光器における回折格子角度制御構造

回折格子角度の制御は、DST 棟 1 階制御室の計算機 VAX4000、Carl Zeiss 製全体制御盤 (Zeiss rack)、2 階観測室の制御盤 Horizontal Display Board (HDB)、分光器室の回折格子駆動用モーターおよびエンコーダーによってなされる。

回折格子角度表示・変更に関するこれらの機器間の通信内容を図 1 に示す。制御盤 HDB において、プッシュスイッチおよびディップスイッチで選択されたコマンドは Zeiss rack に送信される。回折格子角度変更では従来、制御盤 HDB 上の図 2 に示されるディップスイッチにて手動で値を選択し、角度変更開始の際に START ボタンを押す。それをうけて Zeiss rack を経由し VAX4000 上で回折格子の動作中フラグがオンとなり、制御盤 HDB の START ボタンが点灯する。角度は度単位 2 桁、分単位 2 桁を設定し、制御盤内では表示される 10 進数に対してディップスイッチの各桁を 2 進数に変換して(例 $52^{\circ} 31'$ であれば $40^{\circ} +10^{\circ} +2^{\circ} +20' +10' +1'$)、Zeiss rack へと送信される。Zeiss rack でさらに回折格子目標角度は度・分各々 2 進数 10 進数に変換され、その値は VAX4000 へ送信される。現在の回折格子角度はエンコーダから Zeiss rack を経由して VAX4000 に送られ、その都度 VAX4000 および Zeiss rack が 10 進数の度・分に変換し制御盤 HDB に表示される。回折格子角度変更は

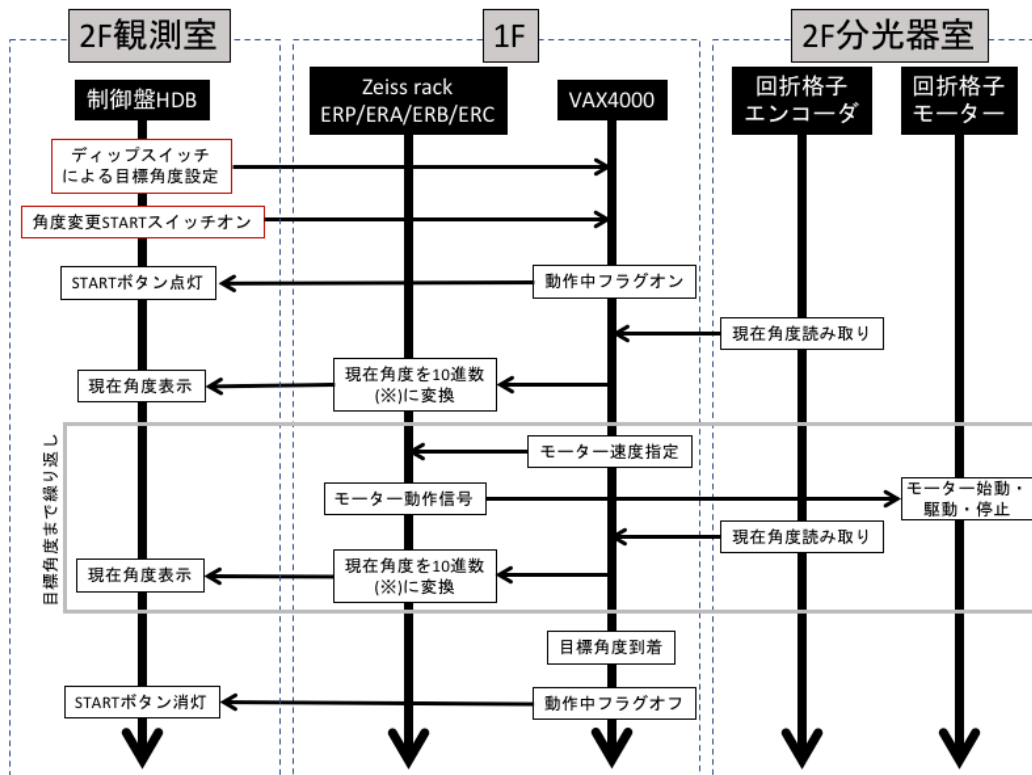


図1 DSTにおける回折格子角度変更に関する機器間の通信内容。赤四角は今回改修した箇所を示す。(※)の10進数については、表1に示す10進数の各桁を2進数に変換した情報である。

VAX4000 がモーター速度を指定し、Zeiss rack がドライバとなりモーターを駆動させる。エンコーダおよび VAX4000 により目標角度に到達したことが確認されると、VAX4000 で動作中フラグがオフとなり、制御盤 HDB 上で START ボタンが消灯する。

制御盤 HDB において各コマンドや回折格子種類および角度に関連した信号ラインには通し記号が割り振られている。記号とコマンドの対応を表1に示す。回折格子およびその角度の設定の際には、これらの通し記号に対応して出力は 15V(H)と 0V(L)間の接点信号、入力は 18V(H)と 0V(L)の電圧値として Zeiss rack との間で送受信される。



図2 制御盤 HDB 上の回折格子および角度設定スイッチ

3. 自動制御化

必要とする機能は、観測用 PC によりカメラが設置されている位置および目標波長を入力し、同 PC から移動開始コマンドを送信することにより回折格子を移動させ、目標とする波長がカメラ視野内に入ることである。またこれらをライブラリ化することにより、同 PC における観測シーケンスの中で自動的に、必要な波長に対応した回折格子角度へと移動させることである。そのために本章に示すハードウェアおよびソフトウェアの開発を行った。

3.1 ハードウェア

目的は制御盤 HDB を介さずに観測 PC と Zeiss rack の間で信号を直接送受信することである。本構成では CONTEC 社製デジタル IO DIO3232LX-USB (DIO)を用いることで、USB インターフェースにより Zeiss rack と送受信した。DIO と Zeiss rack のインターフェース回路図を図 3 に示す。DIO と DST 間の接続は、HDB 内に設けられた HDB-Zeiss rack 間コネクタを外して、保守用の既存ブレッドボード(図 4 右)を挿入することによりおこなった。

観測 PC から出力され Zeiss rack に入力する信号に対しては、デジタル IO によるスイッチ信号とフォトカプラ TLP521 を介して、表 1 に示される HDB の信号に対応する信号を Zeiss rack に入力した。接続に用いたデジタル IO チャンネル(I-#, O-#)とフォトカプラ回路(Ki-#, Ko-#)、ブレッドボード間の接続を表 2 に、またこれらを接続した追加モジュールの全体図を図 4 に示す。これにより HDB を介さずに命令信号を送受信することが可能となった。Zeiss rack から出力され観測 PC に入力する信号に対しては、デジタル IO および制御盤 HDB への入力を並列に接続した。これにより、選択されている回折格子の番号および動作中か否かの信号を制御盤 HDB から確認することができる。

表 1 制御盤 HDB における分光器・角度変更に関する通し記号対応表

通し記号	内容	HDB 上の入出力
r	移動中	入力
T	回折格子 1 選択	入力
t	回折格子 2 選択	入力
s	回折格子 3 選択	入力
n	移動開始	出力
W	回折格子 1 選択	出力
X	回折格子 2 選択	出力
Y	回折格子 3 選択	出力
u	角度符号+/-	出力
v	40°	出力
w	20°	出力
x	10°	出力
y	8°	出力
DD	4°	出力
EE	2°	出力
BB	1°	出力
CC	40'	出力
HH	20'	出力
JJ	10'	出力
KK	8'	出力
LL	4'	出力
MM	2'	出力
NN	1'	出力

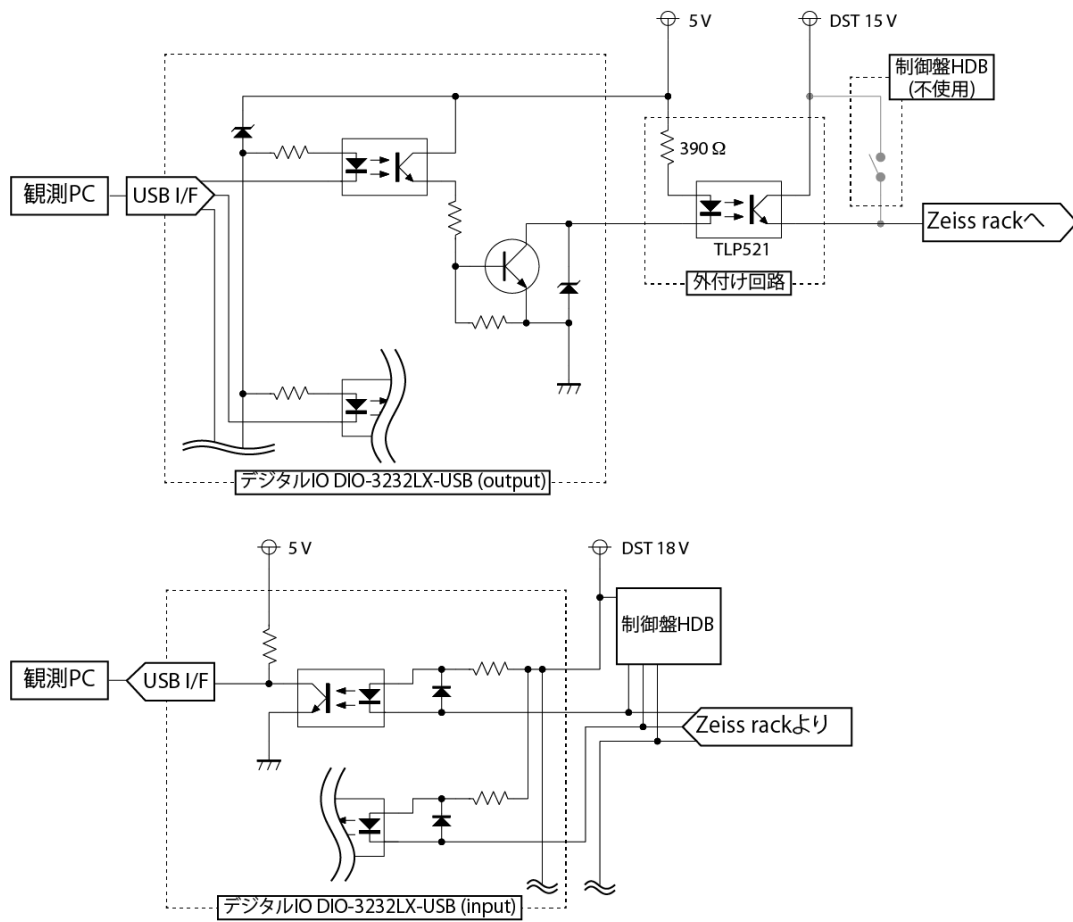


図3 改定部分の回路図

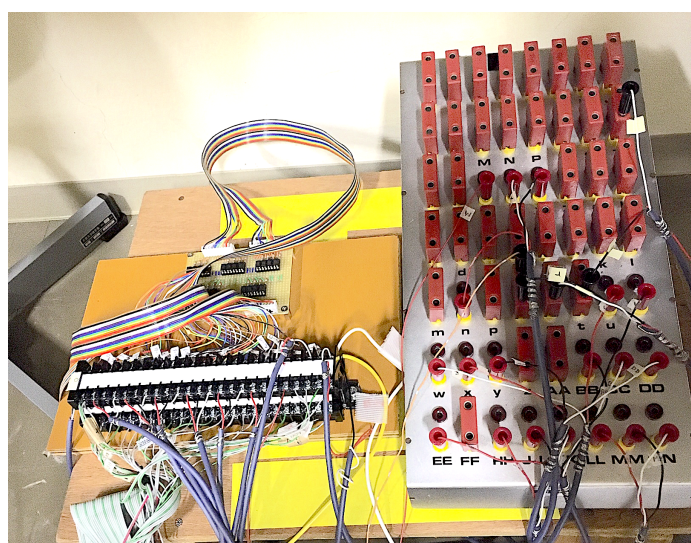


図4 追加モジュール全体図

表 2 接続表。色は接続する各モジュールを示しており、灰は HDB における出力信号、黄は HDB における入力信号、水色はフォトカプラ回路、赤は DIO 入出力、緑は DST の入出力用電源、ピンクは組端子台の通し番号を表している。組端子台番号の両側が接続されている状態を示す。

		Pin Num. of block (upper)			TLP numbers	Pin Num. of block (lower)	DIO	
	5V	0	Ko-5V		GND 5V	0	B01, B02, B29, B30	common minus for output ports
grating sign	u	1	Ko-0	TLP	Ki-0	1	B03	O-0
40 deg	v	2	Ko-1	TLP	Ki-1	2	B04	O-1
20 deg	w	3	Ko-2	TLP	Ki-2	3	B05	O-2
10 deg	x	4	Ko-3	TLP	Ki-3	4	B06	O-3
8 deg	y	5	Ko-4	TLP	Ki-4	5	B07	O-4
4 deg	DD	6	Ko-5	TLP	Ki-5	6	B08	O-5
2 deg	EE	7	Ko-6	TLP	Ki-6	7	B09	O-6
1 deg	BB	8	Ko-7	TLP	Ki-7	8	B10	O-7
40'	CC	9	Ko-8	TLP	Ki-8	9	B11	O-8
20'	HH	10	Ko-9	TLP	Ki-9	10	B12	O-9
10'	JJ	11	Ko-10	TLP	Ki-10	11	B13	O-10
8'	KK	12	Ko-11	TLP	Ki-11	12	B15	O-12
4'	LL	13	Ko-12	TLP	Ki-12	13	B16	O-13
2'	MM	14	Ko-13	TLP	Ki-13	14	B17	O-15
1'	NN	15	Ko-14	TLP	Ki-14	15	B18	O-16
start	n	16	Ko-15	TLP	Ki-15	16	B19	O-17
select G3	Y	17	Ko-16	TLP	Ki-16	17	B20	O-18
select G2	X	18	Ko-17	TLP	Ki-17	18	B21	O-19
select G1	W	19	Ko-18	TLP	Ki-18	19	B22	O-20
grating moving	r	20	A03	I-0		20		
G3 not selected	s	21	A04	I-1		21		
G2 not selected	t	22	A05	I-2	15 V	22	Ko 15V	Ko 15V
G1 not selected	T	23	A06	I-3	18 V	23	A19, A20,	common plus for input ports

3.2 ソフトウェア

構成は DIO-3232LX 用のデバイスドライバ API、API を IDL から呼ぶため C++ によるライブラリ、および IDL プログラム群からなる。API は CONTEC が配布している API-DIO(WDM) 開発環境 Ver. 7.60 を用いた。DIO 初期化・コマンド送受信を IDL で行うため、C++製ライブラリ DIO_USB.dll を Visual Studio 2017 によって新たに製作した。IDL プログラム群は次の構成となる。

- DIO_USBlib.pro : DIO ライブラリの読み込み、初期化・DIO 入出力コマンド送受信
- DST_GRLib.pro : DIO 入出力と DST 入出力の対応づけ、回折格子角度と DST 出力チャンネルの変換
- hsdst.pro : 波長・カメラ位置から回折格子角度への変換と波長移動コマンド送信インターフェース(図 5)
- Grating_seq.pro: csv ファイルを入力として観測シーケンスを実行

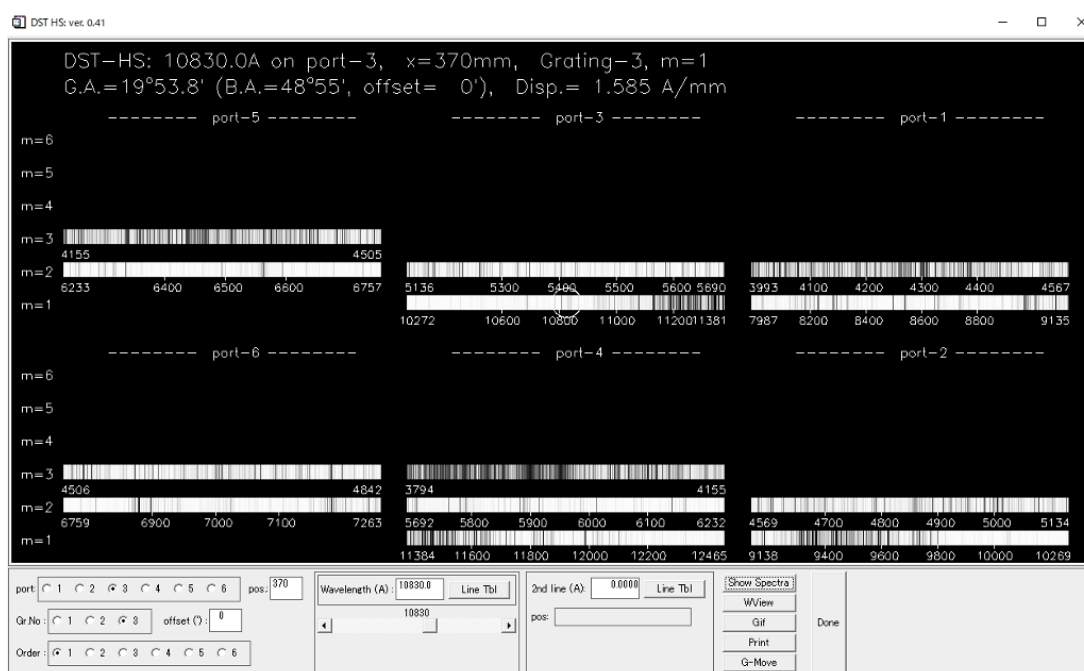


図 5 hsdst.pro の画面。6つのスペクトル群は水平分光器の6つの出力ポート(1-6)を表す。右下の[G-move]をクリックすることで、表示されているスペクトルが観測できる位置に向かって、回折格子が移動する

Grating_seq.pro に入力される csv ファイルは「ラベル」、「波長」、「露出時間」の表となっており、指定した波長のスペクトルを順次観測することが可能である。入力 csv ファイルの例を図 6 に示す。

```

chrlines20200810.csv
IRlimit,11000,2000,
HeI,10830,2000,
CaII,8662,1000,
CaII,8542,1000,
CaII,8498,1000,
HI(Ha),6562.8,100,
HeI(D3),5876,100,
HI(Hb),4861.3,100,
HI(Hg),4340.5,100,
HI(Hd),4101.5,100,
CaII(H),3968.5,1000,
CaII(K),3933.7,1000,
UVlimit,3500,1000,

```

図 6 入力 csv ファイルの例

4. 設定-到達波長間の誤差

本章では開発したシステムを用いた際の、設定した波長に対する到達した波長の誤差を評価した。まず Zeiss rack に送信する角度の精度に由来する設定波長自体の精度を幾何的に示し、実際に動作させた時の到達波長の精度について議論する。

4.1 設定波長精度

本節では設定角度精度由来で発生する設定波長精度について議論する。制御盤 HDB において、設定角度の分解能は 1 分角であり、したがって 1 分角に対応する波長が設定時において制限される制御波長精度となる。

水平分光器の概略図を図 7 に示す。スリットを通過した光はコリメータ鏡でコリメートされたのち、回折格子により波長ごとに分散し、カメラ鏡によりポートにスペクトルが結像される。カメラ鏡およびポートはそれぞれ 6 つ(図 5 参照)あり、ポートにカメラを複数台設置することにより、同時多波長観測が行われる。

回折格子の回折次数 m 、波長 λ 、格子定数 σ 、入射角 α 、回折角 β の関係は次の式で表される。

$$\begin{aligned} m\lambda &= \sigma (\sin \alpha + \sin \beta) \\ &= 2\sigma \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \end{aligned}$$

今、回折格子法線と回折格子入射光線のなす角を回折格子角度 θ_g 、回折格子中心とカメラ鏡中心を結ぶ線と回折格子入射光線のなす角を θ_p とおく。また水平分光器のポート中心からのカメラ位置 x 、カメラ鏡の焦点距離を f_c とすると、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \alpha &= \theta_g \\ \beta - \alpha &\sim \theta_p + \frac{x}{f_c} \end{aligned}$$

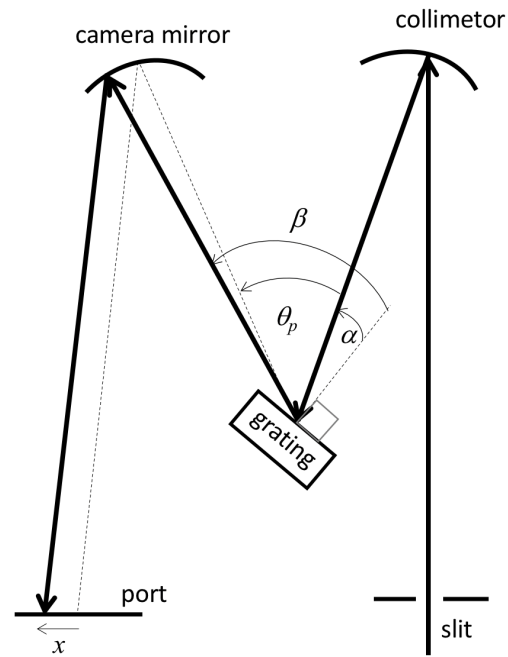


図 7 水平分光器概念図と変数の定義

である。これらの式を合わせて θ_g で解くことにより、回折格子角度 θ_g と観測波長 λ の関係式を得る。

$$\theta_g = \sin^{-1} \left\{ \frac{m\lambda}{2\sigma \cos(\theta_p + x/f_c)/2} \right\} - \frac{\theta_p + x/f_c}{2}$$

各回折格子およびその設置パラメータを表3に示す。これらの値を代入することにより、設定角度分解能である1分角に対応する波長分解能が得られる。3種類の回折格子および各波長に対し、ポート#3、370 mm ($x=0$)における1分角に対応する波長分解能は、図8に示される関係となる。

表3 DST 水平分光器パラメータ[2]

パラメータ	単位	値
カメラ鏡焦点距離 f_c	mm	10002.3
ポート#1 カメラ鏡角度 θ_{p1}	°	-10.02
ポート#2 カメラ鏡角度 θ_{p2}	°	-6.003
ポート#3 カメラ鏡角度 θ_{p3}	°	-1.983
ポート#4 カメラ鏡角度 θ_{p4}	°	2.038
ポート#5 カメラ鏡角度 θ_{p5}	°	6.057
ポート#6 カメラ鏡角度 θ_{p6}	°	10.08
回折格子#1, #2 格子定数 $\sigma_{1,2}$	$\mu\text{m}/\text{line}$	0.833
回折格子#3 格子定数 σ_3	$\mu\text{m}/\text{line}$	1.667

4.2 計測セットアップ

回折格子#1-#3の1次光を得るために、水平分光器ポート#3、370 mmの位置にカメラを設置した。カメラは浜松ホトニクス社製デジタルCMOSカメラORCA Flash 4.0を用いた。ORCAは6.5 $\mu\text{m}/\text{pix}$ 、2048 x 2048ピクセル、検出器サイズ13.3 mmであり、図9に示すように近紫外から近赤外域に広い感度を持つ。広い波長範囲のデータ取得の際の色収差を抑えるために、縮小光学系を用いず、カメラをポート出口に直接マウントした。また2次光の影響を取り除くため、3500 - 6563 Åでフィルタなしの計測を行うとともに、8498 - 11000 Åの範囲ではブロッキングフィルタとしてRG610を用いた計測を行った。RG610の透過率を図9に示す。

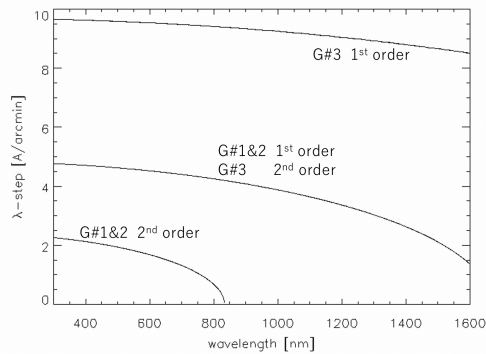


図8 回折格子角度1分角に相当する波長幅の波長依存性

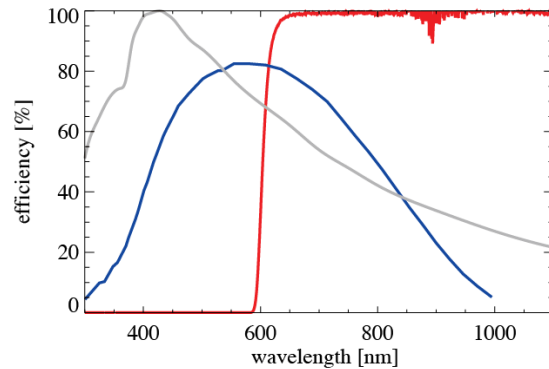


図9 (青)ORCA Flash 4.0 の量子効率[3] (赤)ブロッキングフィルタ RG610 の透過効率 (灰)規格化した太陽連続光スペクトル

長波長側から短波長側および逆の駆動時におけるそれぞれの誤差を導出するため、長波長側の開始波長として 11000 Å、短波長側の折り返し波長として 3500 Å を計測し、合わせて 13 波長位置のデータを取得した。計測した波長位置のリストを表 4 に示す。11000Å から 3500Å まで短波長に向かった後、3500Å から 11000Å まで長波長に向かう往復を 1 セットとし、各回折格子について、5 セット取得した。回折格子#1 のデータについては、回折格子#1 の状態のまま往復してデータセットを取得した。一方回折格子#2、#3 のデータについては、1 セット取るたびに回折格子を#1→#2→#3 の順に変更しながらデータセットを取得した。

そのままの計算式では計測波長が視野内に収まらなかったため、設定角度に対して回折格子#1, #2, #3 につきそれぞれ 14、7、5 分角のオフセット値を追加した。このオフセット値は回折格子角度の原点、カメラ固定時の設置誤差、分光器室内のカメラ鏡の調整誤差に起因する値である。

表 4 計測波長リスト

イオン種	波長 [Å]
(長波長リミット)	11000
He I	10830
Ca II	8662
Ca II	8542
Ca II	8498
H I (H-alpha)	6562.8
He I (D3)	5876
H I (H-beta)	4861.3
H I (H-gamma)	4340.5
H I (H-delta)	4101.5
Ca II (H)	3968.5
Ca II (K)	3933.7
(短波長リミット)	3500

4.3 視野中心波長の導出と設定波長に対する動作波長の誤差

彩層吸収線周辺のスペクトルについて、回折格子の角度を切り替えながら検出器視野中心の波長を導出することにより、実際に計測された波長の誤差および再現性を評価した。

検出器視野中心の波長導出の手順を次に示す。ダーク処理、スペクトルデータの分散-空間軸をそれぞれ検出器画面角の x-y 方向と平行にした後、NSO で公開されているスペクトルアトラス [4] における表 4 の吸収線周辺のスペクトルと、DST で取得したスペクトルを比較した。各波長領域・回折格子ごとに 2-7 本の吸収線を同定し、ピクセル-波長の関係について直線近似を行うことにより視野中心における波長を導出した。この際波長決定の誤差は 1.2×10^{-4} Å 以下であった。

回折格子ごとの設定-計測波長間の誤差を図 10 に示す。誤差が回折格子の角度に対して ± 1 分角相当の波長幅内にある場合には設定分解能内にあり、4.1 で示したモデルがよく合うと言える。図 8 より、1 分角相当の波長幅は回折格子 #1、#2 で 4.0 - 4.8 Å、#3 で 9.0 - 9.6 Å であり、いずれの回折格子も設定分解能内の精度であった。

観測波長毎の再現性を確認するため、長波長から短波長に向かう駆動時・短波長から長波長に向かう駆動時について、5 セットごとの相対波長を調査した結果を図 11 に示す。相対波長の標準偏差の平均は、回折格子 #1, #2, #3 でそれぞれ 0.064 Å、0.077 Å、0.27 Å であった。

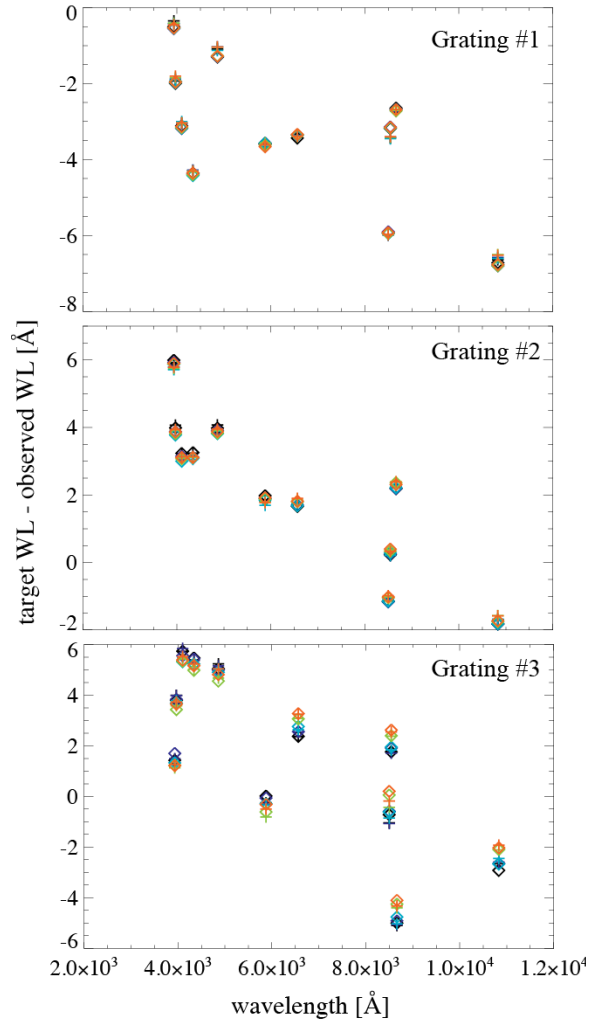


図 10 設定波長と移動後の視野中心波長。赤・緑・水・青・黒色はそれぞれ 1-5 番目のスキャンデータである。また◇は長波長から短波長へのスキャン、+は短波長から長波長へのスキャン中のデータを示す。

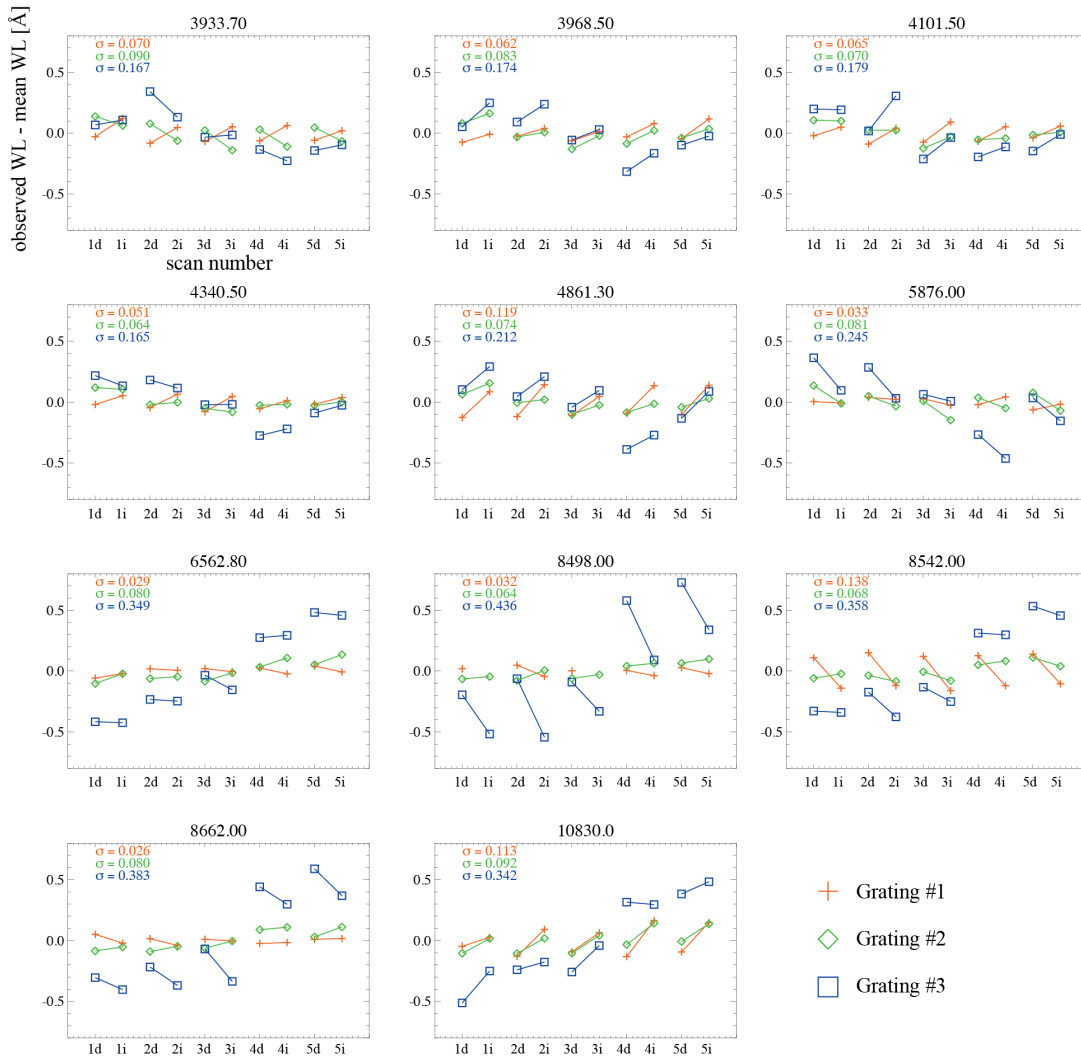


図 11 移動後の視野中心波長のスキャンごとの変化。横軸は 5 回のスキャンのそれぞれについて、長波長から短波長 (decrement) および短波長から長波長 (increment) に移動した時のデータ点である。視野中心波長の標準偏差を各図のレジェンドに示す。

5. 科学観測への適用例

本自動制御システムを用いて、DST 水平分光器による 3500 - 11000 Å のスペクトルを取得した。

5.1 観測セットアップ

回折格子#1 の 1 次光を得るために、水平分光器ポート#3、370 mm の位置にカメラを設置した。4 章と同様カメラは浜松ホトニクス社製デジタル CMOS カメラ ORCA Flash 4.0 を使い、縮小光学系を用いず、カメラをポートに直接マウントした。また 2 次光の影響を取り除くため、3500 - 6400 Å でフィルタなしの計測を行うとともに、6380 - 11000 Å の範囲でブロッキングフィルタとして RG610 を用いた計測を行った。スリットは 20 μm 幅を用い、太陽面上のターゲットは太陽中心の静穏領域とした。計測は 2020 年 8 月 15 日 11:54 - 17:50 (日本標準時)に行なった。

このセッティングで 3500 - 11000 Å の範囲で計測する場合、回折格子角度は 13° 3' - 42° 14'の間を移動し、検出器上の波長サンプリングは 4.1 - 5.3 mÅ/pix となる。データ取得後にポストプロセスとして波長をつなぎ合わせるために、視野の 50%を重複させながら回折格子角度を移動させた。この際要求される角度移動量は 1 ステップあたり 1.15 分であるが、角度移動コマンドの分解能は 1 分単位に制限される。3500 - 6400 Å, 6380 - 11000 Å の範囲をスキャンする際の角度移動回数はそれぞれ 546 回、975 回であった。

5.2 太陽中心スペクトルアトラス

観測された太陽中心のスペクトルアトラスについて、ダーク処理および連続光成分を 1 に規格化したものを図 12 に示す。

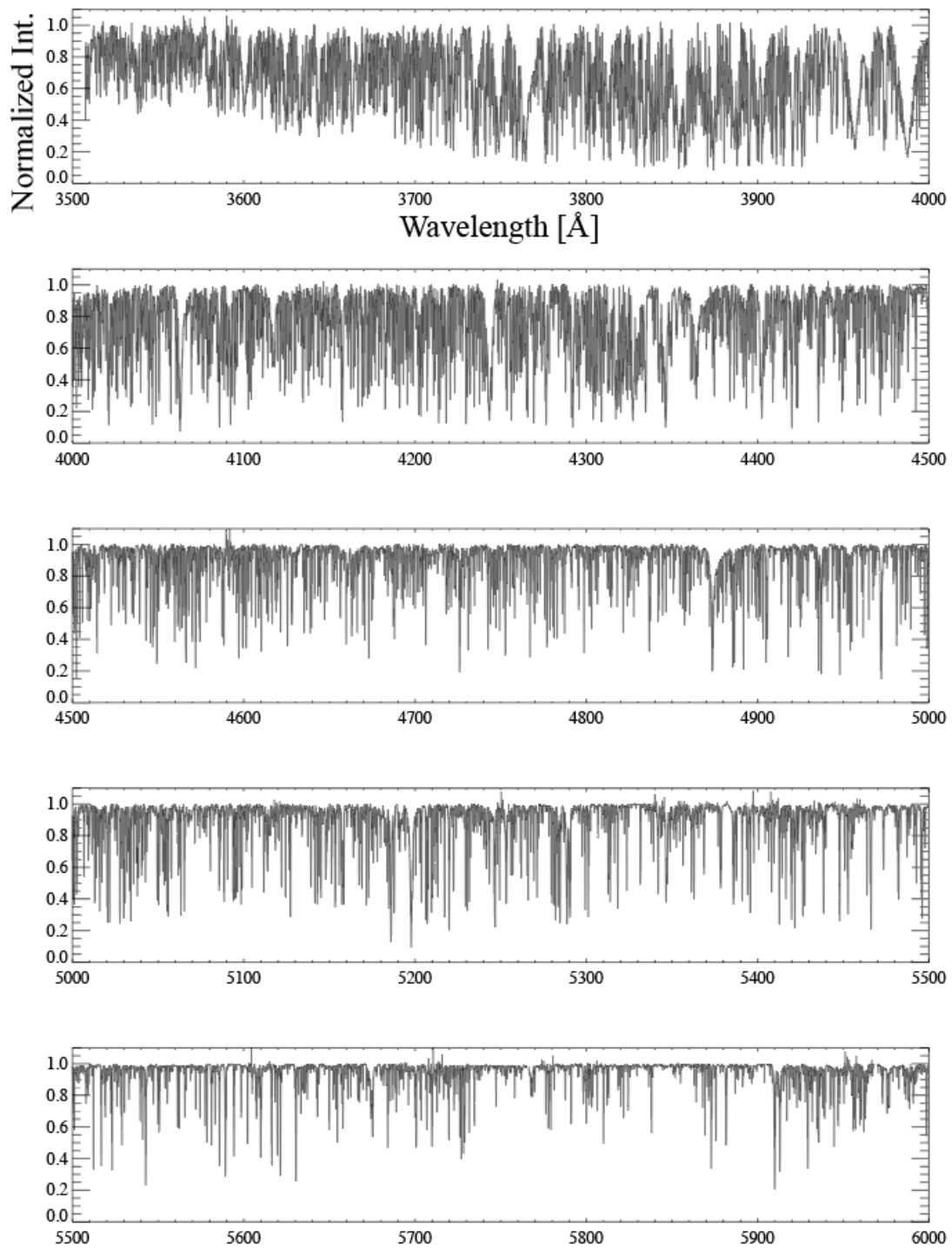


図 12 DST で得られたスペクトルアトラス

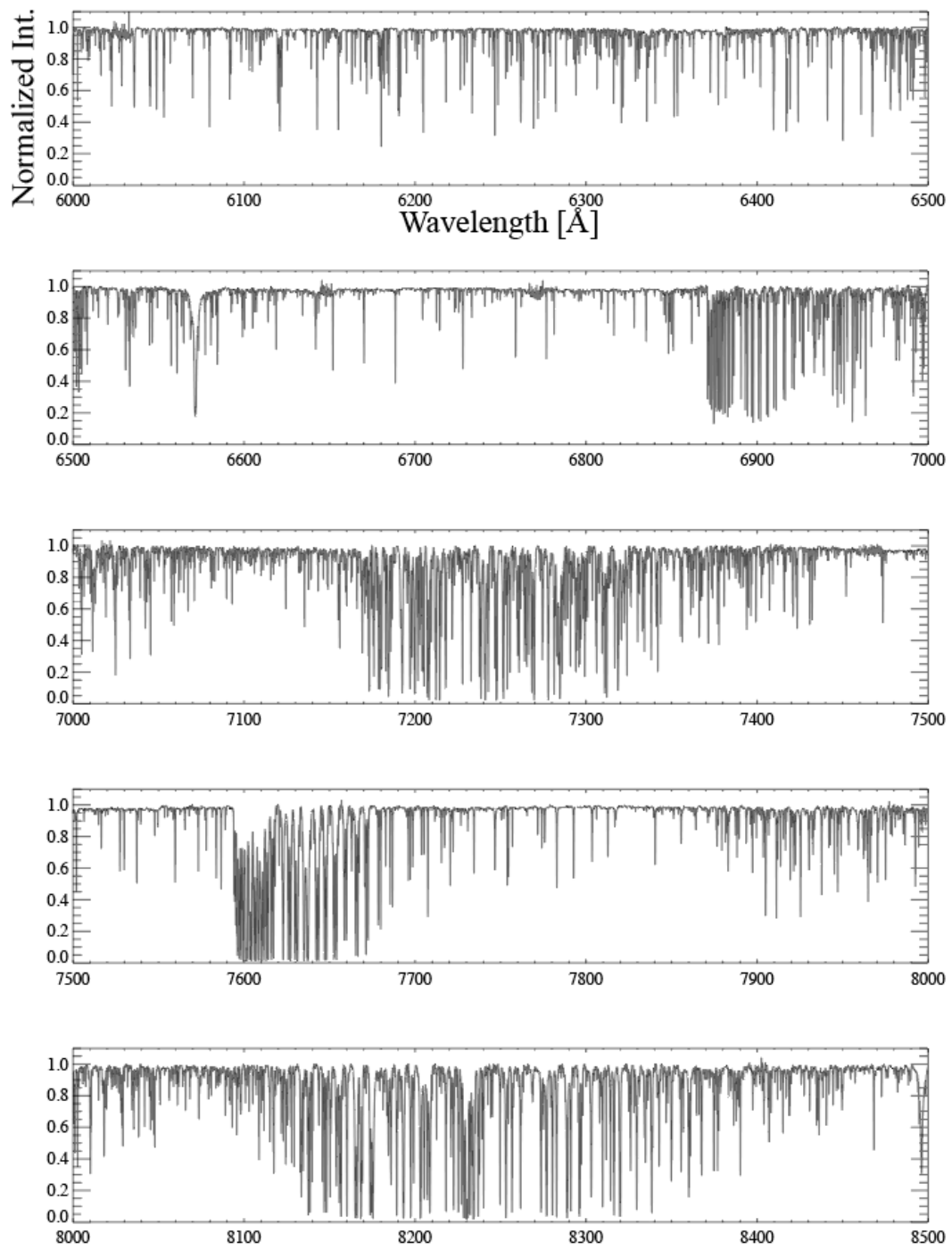


図 12 DST で得られたスペクトルアトラス (続き)

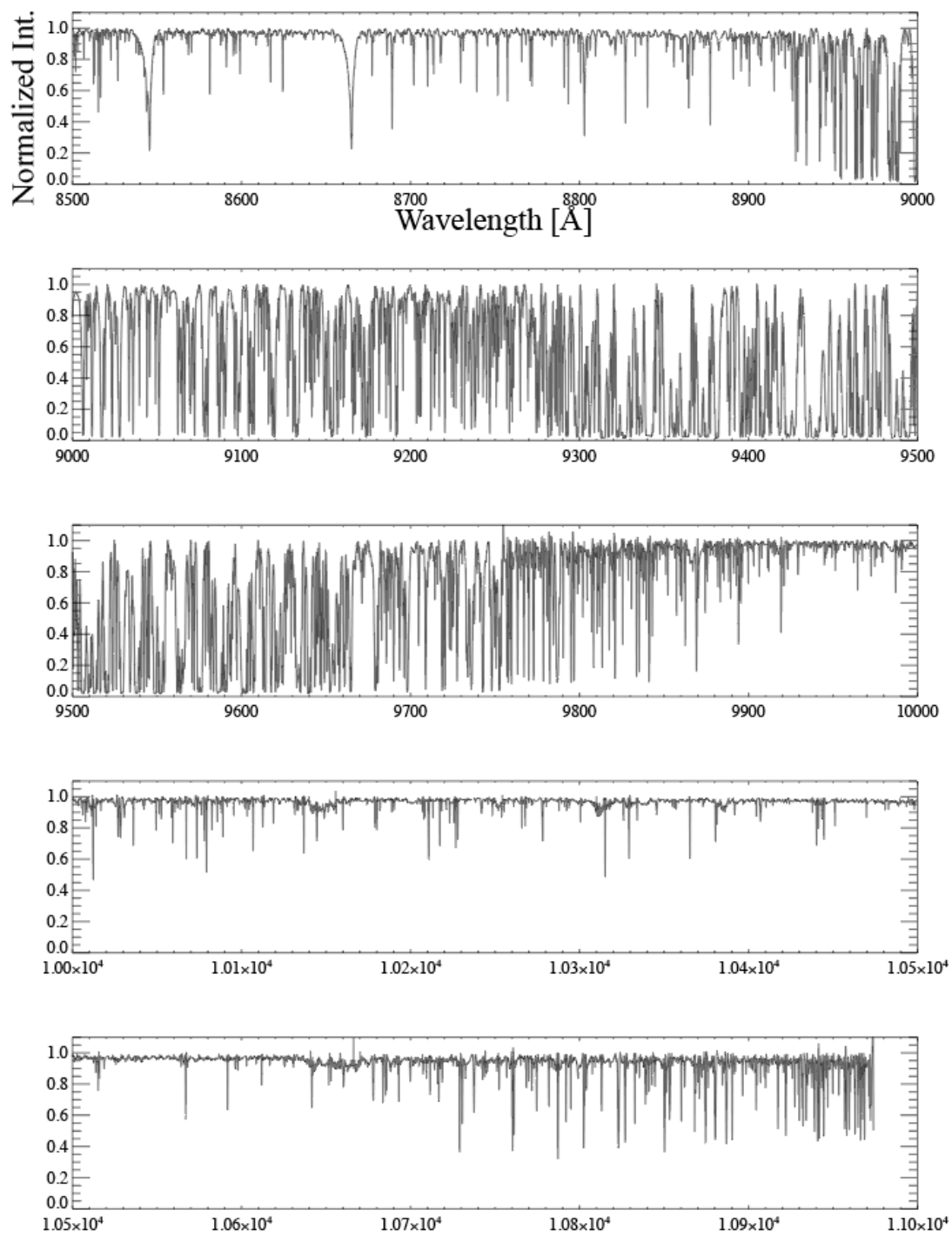


図 12 DST で得られたスペクトルアトラス (続き)

6. まとめ

本研究により、回折格子角度を観測 PC から設定することが可能となり、それにより波長スキャン観測を自動化することができた。応用例としてスペクトルアトラス観測を示したが、他にも多数の彩層線観測に対して少ないカメラ台数で高速観測が可能となるなど、広帯域の多波長観測に対する自由度が大幅に広がった。

参考文献:

- [1] Nakai, Y & Hattori, A., “Domeless solar tower telescope at the Hida Observatory” Kyoto University, Faculty of Science, Memoirs, Series of Physics, Astrophysics, Geophysics and Chemistry (ISSN 0368-9689), vol. 36, p. 385-399 (1985)
- [2] Carl Zeiss Co., LDT., 1979, "60 cm Domeless Solar Telescope Instruction Manual", p.14, p.89
- [3] 浜松ホトニクス ORCA Flash 4.0 カタログ
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SCAS0121J_C13440-20CU_FA.pdf
- [4] “Allen's Astrophysical Quantities” 4th ed. Ch. 14.6, p. 352
- [5] Kurucz, R. L., Furenlid, I., Brault, J., & Testerman, L. “Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm”, NSO Atlas No. 1 (1984)