

# 2015年度内地留学奨学金による成果報告書

坂 江 隆 志

〈埼玉県立浦和西高等学校 〒330-0042 さいたま市浦和区木崎 3-1-1〉

e-mail: ta\_sakae@tk2.so-net.ne.jp

研究テーマ：自作分光器による太陽の多波長分光観測から求められる物理的解析とその結果の検証

受入機関：大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台 太陽観測所

指導教員：花岡庸一郎

研究内容の概要：当自作分光器は、高校授業において高分散な太陽スペクトルを眼視観測する目的で製作したものです。しかし、接眼部にカメラを装着し撮像観測にも応用が可能であり、今までに1次のスペクトルを使った多波長でのスペクトロヘリオグラムの作成やフィラメント運動など速い動きのドップラーグラムの作成に応用してきました。今回内地留学の機会をいただいたことから、高次のスペクトルを使うことでさらに波長分解能を上げて太陽の物理量を求める観測に挑戦しました。その結果、太陽の超粒状斑のプラズマ流を捉えたドップラーグラム、および偏光板を用いた観測によりゼーマン効果を捉えたマグネトグラムの作成に成功しました。一般には難しいと思われるがちな磁場観測ですが、少しの工夫で観測が可能であり教育的にも有効なものと思います。

## 1. はじめに

太陽は昼間観測できるほぼ唯一の天体といっよく、天文教育における観測対象として取り上げやすいものです。最近ではファブリペロー狭帯域フィルターの価格が低下し購入しやすくなったことで、学校やアマチュア天文家によるH $\alpha$ 線やCa II K線での撮像観測が広く行われるようになりました。しかし、ひとたび物理量を求めようとすると分光観測による波長方向情報が必要になります。太陽観測で用いられるような高分散分光器を備えた施設は、国立天文台太陽観測所や京都大学飛騨天文台などですが、このような高度な観測装置を使う前段として、当分光器のような小型のものを手元に置き、装置の開発から観測・解析という一連の過程を経験することは教育的にもたいへん有効であると考えます。そこで、当分光器でどのような観測ができるのか、今までの成果とど

もに今回の内地留学で得られた新たな成果を報告いたします。

## 2. 自作太陽分光器の概要

この分光器の諸性能は以下のようになっています。小型軽量にできており市販の小型赤道儀に搭

形式	リトロ
主鏡	タカハシ FC76 ( $D=76$ mm, $f=600$ mm, F8.0)
コリメータ・カメラレンズ (共用)	BORG 45ED II ( $D=45$ mm, $f=325$ mm, F7.2)
回折格子	Edmund Optics 平面反射式 1,200 g/mm ブレーズ波長 500 nm
スリット	幅 6 $\mu$ m, 長さ 10 mm (自作)
波長分解能 (1次)	$R=30,000$ , 0.02 nm (H $\alpha$ )
カメラ	Atik Titan mono & color 冷却 CCD, Sony ICX424 7.4 $\times$ 7.4 $\mu$ m, 659 $\times$ 494 pixel
検出可能波長	360~1,100 nm カメラの感度による
全長, 重量	1.2 m, 7 kg

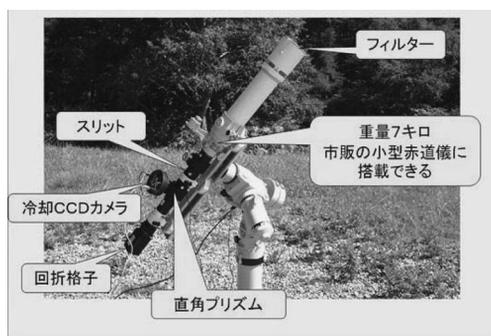


図1 観測の様子。

載することができます (図1)。

### 3. 太陽観測への応用

#### (1) 高校授業での活用

高校物理、地学の教科書にはフラウンホーファー線の記述があり写真も載っていますが、多くはイラストです。実際の吸収線は非常に細く教科書サイズに可視光領域のスペクトルを圧縮すると吸収線はつぶれて見えなくなってしまうからです。生徒実験でよく使われる直視分光器でもフラウンホーファー線はかすかに見えますが、生徒が本当に見えているのか確証がもてません。そこで、高分散なスペクトルを眼視観測することを第一の目的に当分光器を製作しました。生徒は回折・干渉といった分光の原理、吸収線の生成に関する簡単な量子力学を学んだうえで観測に臨みます。この実践については2012年度の東レ理科教育賞で佳作をいただいております、そのレポート\*1に生徒の観察の様子と感想などがまとめてありますので参考にしてください。

#### (2) 1次スペクトルでのヘリオグラム

スリットが太陽の南北方向になるように分光器を固定し、そのスリット上を太陽が日周運動によって約2分間かけて視直径分を移動していく間スペクトル画像を連続撮像し、目的の吸収線を切

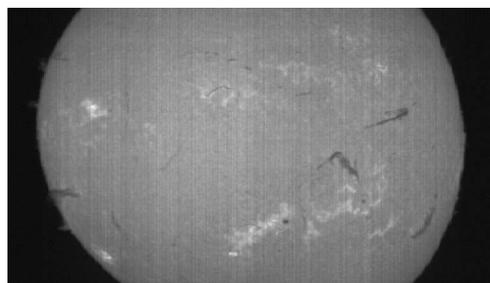


図2 日周運動を使ったスリットスキャンによるH $\alpha$ 画像 (2012年8月1日)。

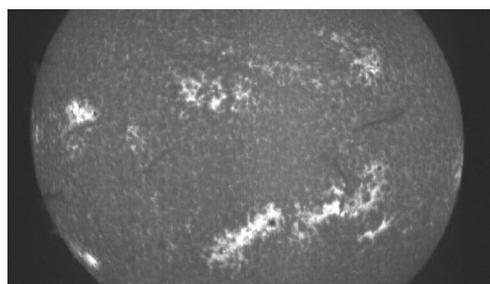


図3 日周運動を使ったスリットスキャンによるCa II K画像 (2012年8月1日)。

り出して並べるとその波長におけるスペクトロヘリオグラムと呼ばれる太陽の単色画像が得られます。いわゆるスリットスキャンという方法ですが、国立天文台(東京天文台)ではこの方法で約100年前からCa II K線の観測が行われていました。自作分光器を用いてこの方法で得られたのが図2のH $\alpha$ 線と図3のCa II K線の画像です。スリットスキャンでは気流の乱れの影響をまともに受けてしまいますので、フィルターを用いてスタック処理した画像に比べるとずいぶん粗いものですが、波長分解能においては優れた性能を持っています。特にCa II K線の画像ではフィラメントも写っていますが、市販のファブリペローフィルターでは波長分解能が十分ではないため写らないものです。

\*1 2012年度東レ理科教育賞佳作「太陽観測用小型軽量高分散高分解能分光器の製作と応用」[http://www.toray.co.jp/tsf/rika/rik\\_024.html](http://www.toray.co.jp/tsf/rika/rik_024.html)

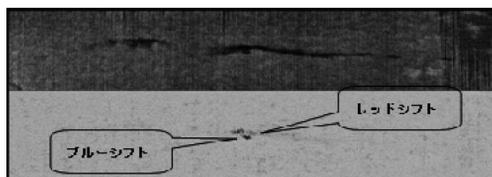


図4 フィラメント (H $\alpha$ ) とそのドップラーグラム (2011年11月16日).

また、フィラメントの動きなどは秒速10 kmを超えることがあり、ドップラー効果による波長偏移からその動きを捉えることもできました (図4).

### (3) 高次スペクトルでの物理観測

#### (a) スペクトロヘリオグラム

より詳細な太陽面の物理状態を知るためには、さらに波長分解能や空間分解能を上げる必要があります。そこで、2次のスペクトルを試してみました。高次スペクトルを用いる場合、ほかの次数のスペクトルが重なってくることからフィルターを使って目的の次数のみが受かるように工夫する必要があります。幸いH $\alpha$ 線656.28 nmや磁場観測で用いるFe I 630.25 nmは赤の領域であるため、R1など市販のシャープカットフィルターが使えます。図5は2次のH $\alpha$ 線の中心波長で作成したスペクトロヘリオグラムです。スキャンの方法も太陽を追尾しながら微動ボタンを押し続ける方法に変更し、13分ほどかけて2,600フレームの画像を取得して空間分解能を上げています。1次のものと比べると波長分解能が上がった分フィラメントやプラージュのコントラストが上がり、画像も滑らかになり、彩層ネットワーク構造 (本来H $\alpha$ 線では両翼の波長だけで見える) も全く見えなくなっています。このことは、彩層の上層部のみの情報を捉えたということになります。図5の右側は、もとになったスペクトル画像の一コマですが、彩層内の水素ガスの擾乱によるドップラー効果で吸収線がぎざぎざしているのがわかります。この日の観測では、フィラメントも大きな運動をしており大きなドップラー偏移が見られました。

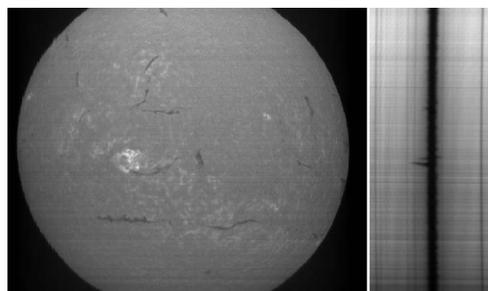


図5 2次スペクトルによるH $\alpha$ スリットスキャン画像と、元になったスペクトル画像の一コマ (2015年3月12日).

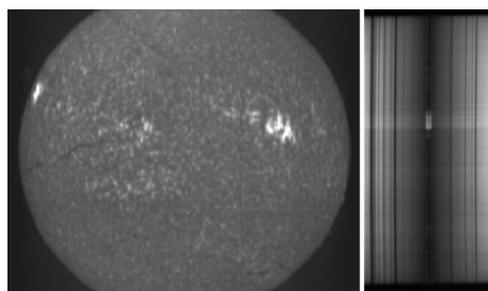
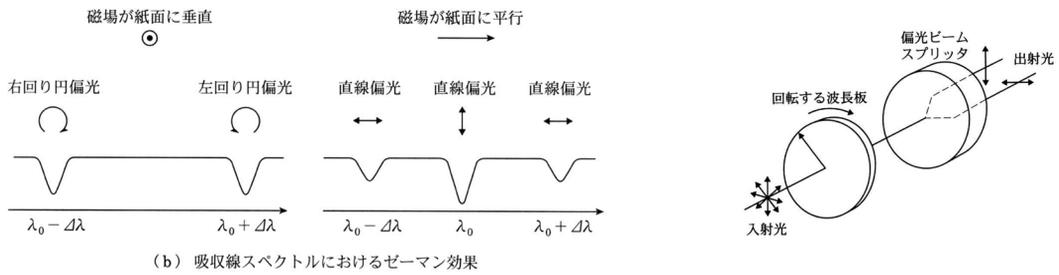


図6 3次のスペクトルによるCa II K線スリットスキャン画像と、元になったスペクトル画像の一コマ (2016年3月25日).

図6はCa II K線 (393.37 nm) の3次のスペクトルを使って作成したスペクトロヘリオグラムと そのもとになったスペクトル画像です。短波長側の次数カットは長波長側に比べると厄介ですが、ちょうどよい干渉フィルターが市販されていました (Baader Planetarium K-line filter)。この画像では、Ca II K吸収線内のK1, K2, K3と呼ばれる構造を分解できており、彩層の立体構造を見ることができそうで、今後の課題としたいと思います。

#### (b) 偏光による磁場の観測

これが今回の内地留学における研究課題になります。太陽で起きるさまざまな現象は磁場を理解することにより解明されてきました。したがって磁場を捉えることは非常に重要です。磁場を求めするにはゼーマン効果を用いるのが一般的で、その原理は図7に示すように回転波長板と偏光装置を



(b) 吸収線スペクトルにおけるゼーマン効果

図7 ゼーマン効果による磁場検出の原理とその検出装置. 文献1より.

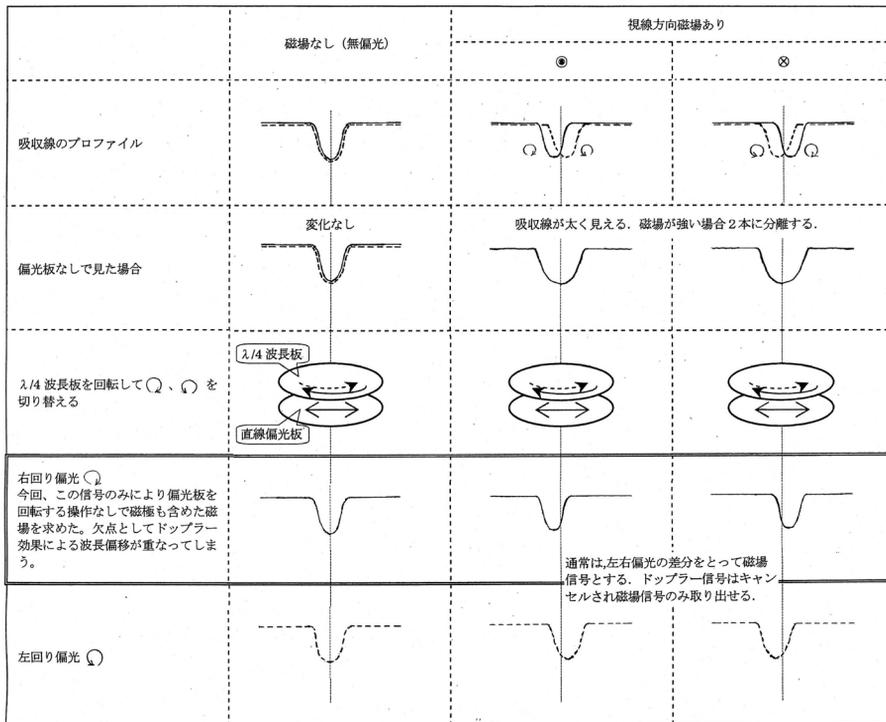


図8 ゼーマン効果による視線方向磁場検出の原理. 波長板を回転させなくても磁場の検出ができる.

用いて偏光の4成分 (I, Q, U, V) を求め、ベクトル磁場を算出します。しかし、これは装置が複雑・大型になり、当分光器のような小型の装置への装着は困難です。

そこで、波長板を回転したりすることなく磁場を検出する方法を考えました。図7 (左図) より、視線方向磁場に対象を絞れば円偏光を検出することで磁極まで求まる観測が可能です。図8は視線方向磁場によって変調された吸収線が円偏光

フィルターとの組み合わせでスペクトル線の偏移がどのように観測されるかをまとめたものです。片方の円偏光を調べるだけで、(ドップラー信号をキャンセルできないという欠点ではありますが) 磁極まで含めた磁場を検出することができます。

可視光領域での磁場によるゼーマン効果は非常に微弱で小型の装置による観測例はないようですが、当分光器の2次スペクトルでの波長分解能は約0.01 nmであり、大きな黒点周りの1,000 gauss



図9 使用した市販の写真円偏光フィルター。

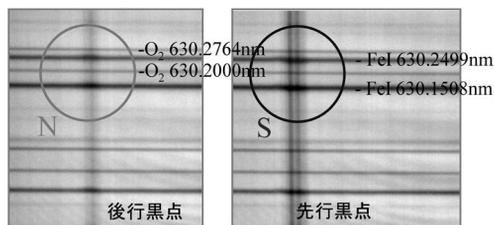


図10 Fe I 630.25 nm 付近の2次スペクトル画像パーローレンズあり 干渉縞が課題 (2015/09/22).

以上あるような強い磁場であれば検出できそうであることがわかりました。そこで、主鏡の筒先に円偏光フィルターを装着し観測を試みました。円偏光フィルターは市販の写真用円偏光フィルター(図9, 直線偏光板と $\lambda/4$ 波長板が貼り合わせてある, Kenko Tokina 製)を裏返しにして使いました。ゼーマン効果の比較的大きい Fe I 630.25 nm 吸収線でテスト観測を行ったところ、磁場を検出できることがわかりました。

図10は Fe I 630.25 nm 吸収線付近のスペクトル画像で、双極黒点で吸収線が逆にずれており、それぞれ逆の磁極を捉えていることがわかります。画像を拡大するためにパーローレンズを挿入していますが、干渉縞が顕著に現れ解析にも影響を与えています。カメラに原因がありそうですが解決できておりません。

図11は、この波長で13分ほどかけてスリットスキャンして約2,600フレームの画像を取得し、そのスペクトル上で地球大気の大気 $O_2$ 吸収線を基準にガウス近似によりサブピクセルまで吸収線位置

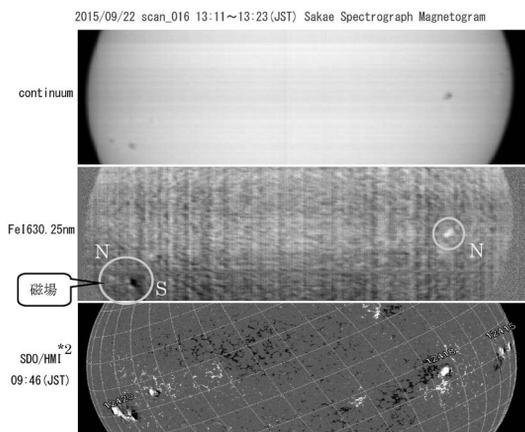


図11 上段: 連続光による黒点画像. 中段: 自作分光器によるマグネトグラム. 太陽全面に見える超粒状斑のドップラー信号に加えて大きな黒点周りの磁場を捉えている. 下段: SDO衛星によるマグネトグラム.

を測定することでその偏移を求めて作成したヘリオグラムです(太陽の自転によるドップラー偏移はキャンセルされるように解析しています)。その結果、太陽全面に見える超粒状斑の対流によるドップラー信号に加えて、大きな黒点の周辺では正負の磁場信号も捉えることに成功しました。

#### 4. おわりに

この分光器に関する研究は2011年度から行い現在に至っております。その間、ここに記した研究テーマ以外に、太陽スペクトルのカラーパノラマ写真の作成、近赤外領域である He I 1083.0 nm の観測、太陽自転速度およびその緯度依存性(差動自転)の検出などにも取り組んできました。これらの研究を進めるうえでは、主に参考文献2)-5)を参考にしました。このように、当分光器は市販の部品に若干の手作り部品を組み合わせで作った小さな装置ですが、本格的な分光観測の第一段階として手元に1台あると有効なのではないかと思えます。これらの取り組みにつきましては、

\*2 SDO/HMI <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>

2012年日本天文学会春季年会から毎年春季年会の教育セッションで発表してきましたので参考にしてください。また、不明な点につきましてはどうぞ表記のメールアドレスにご連絡ください。皆様の参考になり、お役に立てれば幸いです。

## 謝 辞

今回の内地留学でご指導いただいた国立天文台太陽観測所の花岡庸一郎先生には、この分光器の開発当初からお世話になっております。今まで取り組んできた研究テーマはすべて花岡先生のご助言によるもので、その段階ごとの適切なご指導に感謝申し上げます。特に内地留学期間であるこの一年は何度もセミナーを開いていただき、観測データの検討、解析方法、学会や研究会での発表原稿の添削等でたいへんお世話になりました。また、京都大学飛騨天文台の大辻賢一さんには国立天文台在職中から今まで、主に解析方法についてお世話になりました。そのほか、国立天文台名誉教授の日江井榮二郎先生にはいつも研究結果を見ていただき、ご助言と励ましのお言葉をいただきました。茨城大学の野澤恵先生、国立天文台太陽観測所、京都大学飛騨天文台のスタッフの皆さん

など多くの太陽研究コミュニティーの皆様にもたいへんお世話になりました。この場をお借りして感謝申し上げます。

最後に、日本天文学会からは内地留学という貴重な機会と奨学金までいただきありがとうございました。この奨学金はフィルターの購入、国立天文台でのセミナー、学会参加のための交通費等に当てさせていただきました。また、日本学術振興会からは科研費（奨励研究）を2011、2012、2013、2015年度にわたり、東京工業大学からは教育研究助成として2015年度に補助金をいただきました。これらの補助金をいただけたからこそこのような研究を続けていくことができましたことを申し添えて御礼とさせていただきます。

## 参考文献

- 1) 桜井隆 ほか 編, 2009, シリーズ現代の天文学「太陽」(日本評論社)
- 2) 柴田一成 ほか, 2001, 最新画像で見る太陽 (ナノオプトニクス出版局)
- 3) 柴田一成, 上出洋介 編著, 2011, 総説 宇宙天気 (京都大学学術出版会)
- 4) 清水一郎 編, 1983, アストラルシリーズ太陽観測 (恒星社厚生閣)
- 5) Richardson Gratings, 2005, Diffraction Grating Handbook (Newport)