

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



埼玉県立浦和西高等学校 坂江隆志*

目的

高等学校の物理、地学では「分光」を扱い、太陽のスペクトル中に存在する吸収線（ Fraunhofer 線）も学習する。しかし、多くの教科書に掲載されているものは虹色の帯に黒い線を描いたもので、写真ではなくイラストであり、実際とは異なるものである。太陽は昼間観測できるほぼ唯一の天体であり、観察実験が重視されるなか、天文分野の観察実験に太陽を取り上げることは意義深いものと考えられる。そこで、太陽の高分解能スペクトルを眼視観察できるようにすることを目的として、授業で手軽に使用できる小型で軽量の太陽観測用分光器を、比較的安価な市販の部品を組み合わせるにより製作した。

この自作分光器による観察から、生徒は元素による吸収スペクトルの理解を深められるだけでなく、干渉という物理現象により生ずる純粋な色を体験することができる。さらにこの分光器は、撮像による物理的な解析にも応用できる。そこで、スリットスキャンによるスペクトル画像から、太陽単色画像（スペクトロヘリオグラム）、および太陽面の速度場画像（ドップラグラム）の作成を行った。

概要

小型軽量にするために、反射式回折格子をリトロ配置し、コリメーターレンズとカメラレンズを共用とした。また、波長分解能の目標を、スリットスキャンで H α や CaK の吸収線が分解できる 0.1nm (1Å) 以下として設計を行った。以上の性能を満たす回折格子として、Edmund Optics 社の反射型ブレードホログラフィック平面グレーティング 25 × 25mm、格子周波数 1200 本/mm、ブレード波長 500nm を用いた。この回折格子では、1 次光スペクトルで Resolving Power : R=30000、波長分解能の理論値は $\lambda/\Delta\lambda=R$ より、H α ($\lambda=656.3\text{nm}$) で $\Delta\lambda=0.021\text{nm}$ 、CaK ($\lambda=393.4\text{nm}$) で $\Delta\lambda=0.013\text{nm}$ となり、目標の分解能 (0.1nm 以下) を満たしている。

その他、使用した部品等は次のようになっている。

- ・主鏡：タカハシ FC76 (D=76mm, f=600mm, F/8.0)

- ・コリメーターレンズ、カメラレンズ (共用) :
トミーテック Borg 45ED II
(D=45mm, f=325mm, F/7.2)
- ・スリット：幅 6 μm 、長さ 10mm (自作)

完成した分光器は重量約 7 キロで、市販の小型赤道儀に搭載可能であり、手軽に授業等で活用することができる。高分散のため一度にスペクトル全体を見渡すことはできないが、回折格子が取り付けられた回転ステージのマイクロメーターを回すことで、観察する波長を変えることができる。装置全体は特注のアリガタレール (遊馬製作所に依頼) に固定し、光軸を安定させた。図 1 に分光器の構造図、写真 1 に観測中の様子を示す。

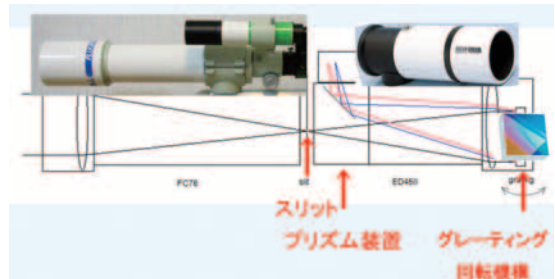


図 1 リトロ式分光器の仕組み
回折格子の傾きにより観察する波長が変わる



写真 1 観測中の分光器

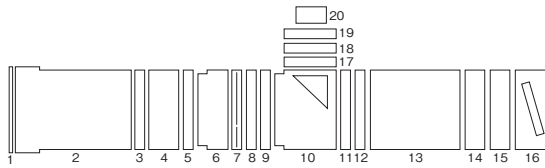
* さかえ たかし 埼玉県立浦和西高等学校 教諭 〒 330-0042 埼玉県さいたま市浦和区木崎 3-1-1
☎ (048) 831-4847 E-mail sakae.takashi.86@spec.ed.jp

教材・教具の製作方法

I. 材料

表1に使用した市販部品の一覧を示す。特に入手困難な部品はないが、工作を要するところが、スリット、回折格子の回転機構、直角プリズム部の3箇所ある。

表1 パーツリスト



No.	メーカー	品番	詳細
1	ケンコー	ND8	減光フィルター
2	タカハシ	FC76	屈折望遠鏡 (D=76mm、f=600mm、F/8.0)
3	ボーグ	7911	M56 → M57/60AD
4	ボーグ	7603	M57/60 延長筒 M
5	ボーグ	7504	2 インチホルダー-S II
6	ボーグ	7425	50.8 → M57/60AD
7	ボーグ	7508	2 インチホルダー-S、スリット
8	ボーグ	7602	M57/60 延長筒 S
9	ボーグ	7504	2 インチホルダー-S II
10	ビクセン	フリップミラー (改)	直角プリズム
11	ボーグ	7528	M42P0.75 → M57AD
12	ボーグ	7457	M57 → M57AD
13	ボーグ	7205	ミニミニドロチューブ
14	ボーグ	7860	M57 ヘリコイド L II
15	ボーグ	6045	ミニボーグ 45ED II (D=45mm、f=325mm、F/7.2)
16	Edmund 他	回折格子ユニット	1200g/mm 500nm (30mm 回転ステージ 他)
17	ボーグ	7839	M42 ヘリコイド T
18	ボーグ	7423	M42P0.75 → M36.4/42P 0.75AD
19	ボーグ	7314	31.7mm アイピースホルダー-SS
20		接眼レンズカメラ	LV10mm、DMK41AU02、Atik/Titan、EOS 等

以上を遊馬製作所のアリガタレール (60cm 特注) に固定する。

II. 製作

工作を要するところは、ボール盤 (ドリル) とヤスリ、タップによる加工が必要となる。

1. スリットの製作

顕微鏡下でカッターナイフの刃を向かい合わせに接着して自作する。顕微鏡に CCD カメラを取り付け、パソコンの画面で顕微鏡像が見られるようにする。10 μm の目盛りがついた対物マイクロメーターを用いて、画面上で 10 μm が読み取れるようにし、この目盛りを使ってカッターナイフの刃を接着剤で向かい合わせに貼りつける。スリットの幅は、使用する主鏡による空間分解能を、シーイングなどの影響を考慮して 2 秒角と見積もり、6 μm とした。また、長さは 10mm である。使用する刃は、直線性および平面性がよいものとして大型カッターナイフの替刃 (ORFA LB10K) を用いた。

2. 回折格子の回転機構

回転ステージを固定するネジの部分にゴムシートを挟むことで、その締め具合から光軸の微調整ができるようにした。

3. 直角プリズム部

ビクセン製フリップミラーの躯体を使用し、内部に 24.5mm ツァイスサイズのアイピース用直角プリズムを取り付けた。

完成した分光器による太陽スペクトル画像の一部を写真 2 に示す。撮像できる波長範囲は使用した冷却 CCD カメラの性能等により、約 360~1000nm である。撮像に使用したカメラは、英国 Atik 社製 Titan-color および mono 冷却 CCD カメラで、16bit 解像度の fits 画像を最高で毎秒 15 枚記録することができる。太陽光は十分な光量があるため、対物レンズに ND8 フィルターを取り付けて観測する。波長分解能を Na (D) 吸収線付近で調べたところ 0.05nm (0.5 \AA) 離れた地球大気による吸収線がはっきり分解できていることが確認できた。この分光器は基本的に 1 次光スペクトルを使って観測するが、回折格子の性質により観測波長の半波長の 2 次光スペクトルが重なってくる。カメラの感度が 360nm 以上であることから、約 700nm より長波長側を観測するときには、2 次光スペクトルの重なりを除くため R64 フィルターを対物レンズの前につける必要がある。

学習指導方法

本作品の第一の目標は、製作した分光器を授業において太陽スペクトルの観察に応用することである。製作した分光器で撮像した太陽スペクトルを、パノラマ写真にしたものを写真 3 に示す。回折格子の傾きを変化させると、絵巻物のようにこのスペクトルの帯を見ることができる。

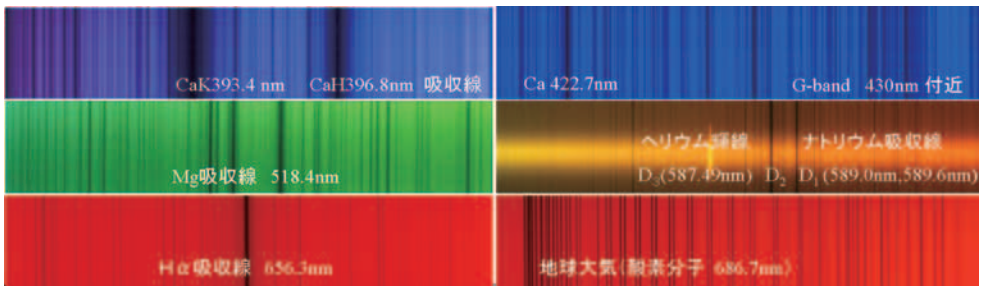


写真2 スペクトル画像の例

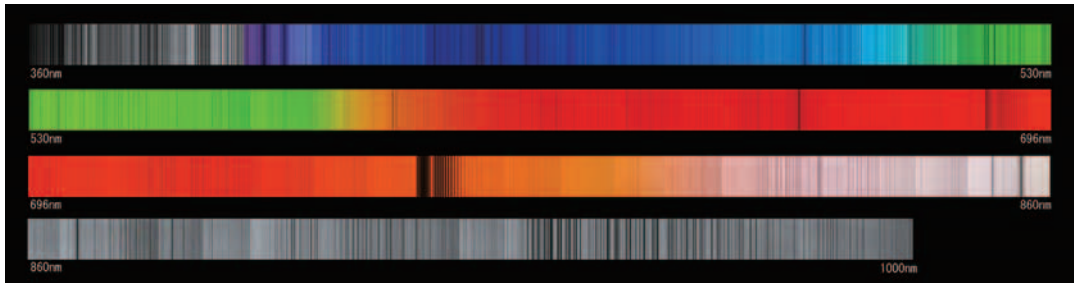


写真3 太陽スペクトルのパノラマ

上2段は可視光で眼視観察ができる。下2段は近赤外領域で肉眼で見ることができない。

写真4に、実験室の南面の窓に差し込む太陽光を用いて観察中の生徒の様子を示す。生徒は、干渉、回折といった回折格子の原理、および吸収スペクトルの原理を初歩的な量子力学の内容も含めて学習したうえで観察に臨む。また、あらかじめカラーCCDによるライブ画像でスペクトルの見所を案内しておく。

さらに、部活動での応用として、スリットスキャンによる物理的解析も行った。図2にその撮像原理を示す。スリットを南北方向にした分光器を固定し、日周運動により移動していく太陽を、毎秒10枚程度連続撮像する。太陽はその視直径分を移動するのに約2分かかるので、撮像枚数は1000枚を超える。各画像における目的の吸収線のスリット方向のピクセルデータを切り取り、順に並べると、その波長における単色太陽像が得られる。これを、スペクトロヘリオグラムと呼ぶ。この方法でHa、CaK吸収線における撮像を行った。写真5のHa画像からは、プロミネンス、ダークフィラメント、黒点、プラージュといった彩層上部の様子がみられる。写真6のCaK画像からは、黒点、プラージュといった彩層下部の様子がみられる。このように、観測する波長を変化させることで太陽大気を立体的にとらえることができる。なお、この画像の作成には画像解析ソフトIDL (Interactive Data Language) を用いた。

また、スリットスキャン画像において、切り取る波長を変化させ、異なる波長同士を比較することにより、ドップラー効果による太陽面の速度場を求めることができる。これをドップラーグラムと呼ぶ。写真5のHa画像に見られるフィラメントについてこの解析を行ったところ、フィラメントの一部で視線方向で地

球に向かう運動（ブルーシフト）と、太陽に向かう運動（レッドシフト）が観測された（写真7）。



写真4 観察中の生徒

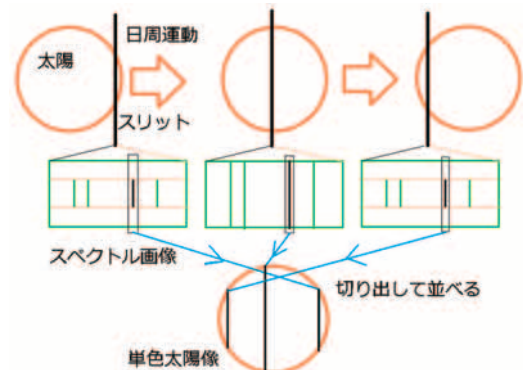


図2 スリットスキャンの原理



写真5 スペクトロヘリオグラム (Ha)

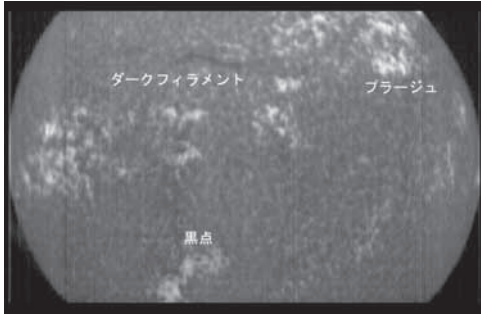


写真6 スペクトロヘリオグラム (CaK)

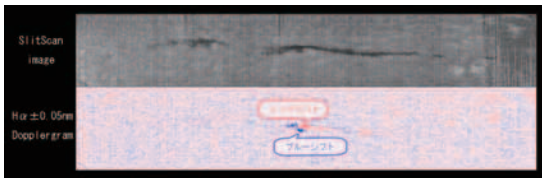


写真7 ドップラーグラム

実践効果

観察に当たり、分光器や吸収スペクトルの原理をきちんと理解している生徒は、実際のスペクトルを見て感嘆の声を上げる。特に、NaD線付近でスリットを太陽リムに当てるとD3輝線と呼ばれる線スペクトルが観察できる(写真2)。これは、地球上より先に太陽スペクトルで発見された元素で、太陽(ギリシャ語でhelios)にちなみ「ヘリウム」と命名された。生徒の感想の一部を示す。

- ・物理と化学が相互に関連していることに興味を持った。
- ・太陽と地球という大きなスケールの中で、原子の中の電子が光を吸収しているというマイクロな世界が広がっていることが面白い。
- ・ヘリウムの語源になっているとは驚いた。
- ・パソコンで見た色はしょせん作り物(RGB合成)で、本物には勝てない。

吸収線のできる原理などをきちんと理解できていないと、「きれい」といった感想にとどまり、理論的な裏づけのもとでの実験観察の重要性を再確認した。

スペクトロヘリオグラムやドップラーグラムは、天文台などで研究者が解析に用いている手法と基本的に同じであり、専門的な研究の一端を体験できる機会となっている。

その他補遺事項

謝辞

本研究に際し、分光器の基本的なアイデアをいただいた田中光化学工業株式会社田中一幸氏、分光器の理論および設計に関する研究会を開いていただき、観測データの解析についてもご指導いただいた国立天文台太陽観測所長花岡庸一郎先生ほか専門研究員の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 「シリーズ現代の天文学 10 太陽」, 日本評論社.
- 2) DIFFRACTION GRATING HANDBOOK, Newport.