

星取県为天体観測用分光器

TORIHIME

操作マニュアル (Ver. 0.1)

2024 年 2 月 15 日

米子高専科学部

目次

1. TORIHIME について
 - 1.1 TORIHIME の構造
 - 1.2 直視分光器にする場合
 - 1.3 スペクトルを撮像する場合
2. 観測方法
 - 2.1 TORIHIME の操作
 - 2.2 スペクトルの撮像
 - 2.3 波長較正用光源の撮像
3. 解析方法
 - 3.1 波長較正
 - 3.2 波長感度補正
4. 付録
 - 4.1 分光標準星一覧表

1. TORIHIME について

星取県の天体観測用分光器「TORIHIME」は、鳥取県教育委員会の令和5年度「とっとり夢プロジェクト事業補助金」の交付を受けて、米子高専科学部が製作した分光器であり、以下の特徴を持っている。

- ・アマチュア天文家が簡単に自作できるように、既製品を多用し、必要な工作の工程を最小限にとどめたこと。
- ・アマチュア天文家にとって自作が極めて困難であったスリットビューワを0次のスペクトルを利用することで簡単に実現したこと。
- ・電子回路を搭載し、0次と1次のスペクトルの切換をコンピュータ制御にしたこと。
- ・4000Åから8000Åまでの可視光線を一度に撮像できる低分散分光器でありながらナトリウムのD線を2本に分解する高分解能を実現したこと。

以上の特徴により、TORIHIMEはアマチュア天文家でも自作可能な分光器でありながら、実際の分光観測では従来の低分散分光器では不可能と言われていた「銀河回転の検出」や散光星雲の電子密度や電子温度などを測定する「分光診断」が可能になると考えられる。

なお、本分光器はあくまで太陽以外の天体を想定して設計しているため、太陽光の入射は厳禁である。

1.1 TORIHIME の構造

図 1.1.1 に TORIHIME の外観と分解図を示す。



図 1.1.1 a TORIHIME の外観

図 1.1.1 b TORIHIME の分解図

TORIHIME はビクセンのフリップミラーを改造したものに回折格子を収め、これに回転機構と駆動用のステッピングモーターを取付け、制御用電子回路を搭載した部分を心臓部としている。さらに、ビクセンの接眼鏡 NLP40 mm の外径がフリップミラーの内ネジの径と同じであることからこれにネジを切り、コリメーターレンズやカメラレンズとして利用し、ボグのヘリコイドを合焦装置とした*。 (**※コリメーターレンズ用のボグのヘリコイドはスリットにピントが合うように調節済みなので、調節厳禁である。**) また、ZWO の電動フィルターホイール (以下 EFW) にスリットなどを収め、あとは、ボグの接続環などでこれらと望遠鏡や CCD カメラを接続したものである。

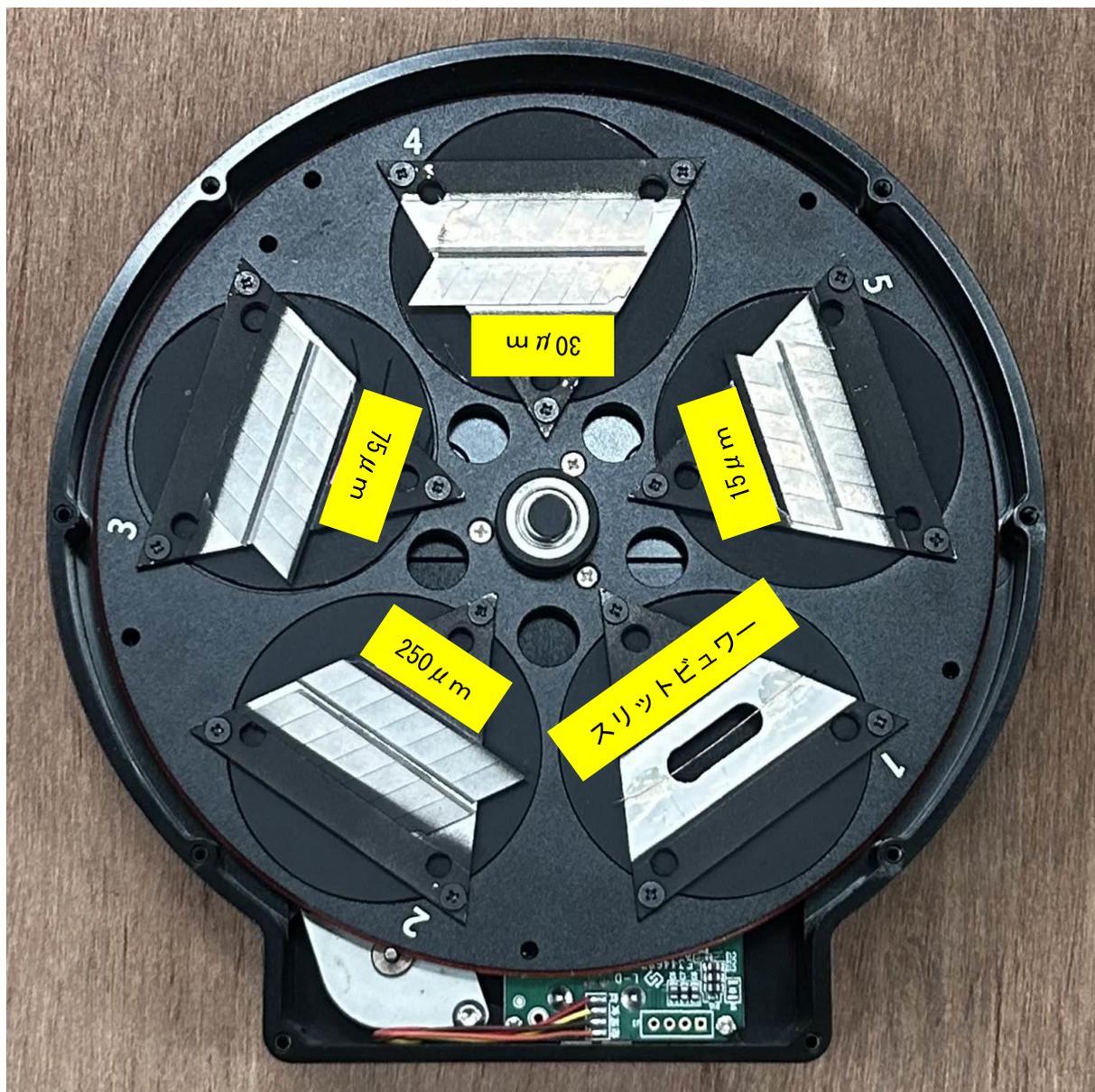


図 1.1.2 ZWO の EFW でのスリットなどの配置

次に、図 1.1.2 に ZWO の EFW 内でのスリットなどの配置を示す。

- EFW1 : スリットビューワー

- EFW2 : 250 μm スリット
- EFW3 : 75 μm スリット
- EFW4 : 30 μm スリット
- EFW5 : 15 μm スリット

なお、スリットはカッターナイフの刃を向かい合わせて、金属板に接着することで製作しており、一番狭いスリット幅は 15 μm である。このスリットを用いると分光器の分解能は約 1200 となり、ナトリウムの D 線 (5895.92, 5889.95 \AA) を 2 本に分解することができる。

1.2 直視分光器として使用する場合

米子市児童文化センターの観望会で直接スペクトルを見せる場合もあると考えられる。その場合は図 1.2.1 のように接眼鏡アダプタを TORIHIME に取りつけて観望する。



図 1.2.1 左：接眼鏡アダプタ 右：TORIHIME にアダプタを取りつけた写真

1.3 スペクトルを撮像する場合

米子市児童文化センターの ZWO ASI 6200MM Pro でスペクトルを撮像する場合は図 1.2.1 の接眼鏡の代わりに 6200MM を TORIHIME に取りつけて接続する。なお、この時のノーズピースはスペクトル撮像用に短く切断したものを使用する。

2. 観測方法

2. 1 TORIHIME の操作

本分光器の特徴は回折格子を回転させることで0次と1次のスペクトルを使い分けることにある。すなわち、0次のスペクトルをスリットビューワに利用して観測天体を視野内に導入し、1次のスペクトルでそのスペクトル撮像を行う。



図 2. 1. 1 ORIHIME 動作ソフトの起動

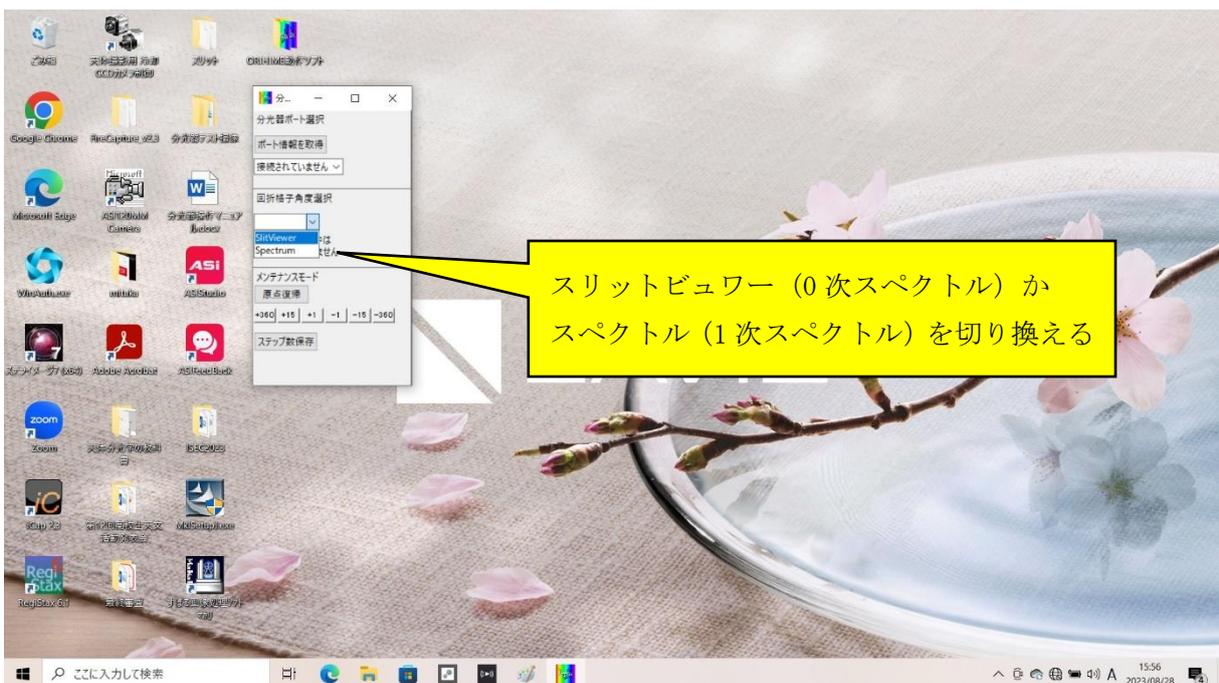


図 2. 1. 2 0 次か 1 次スペクトルの切り換え

そこで、最初に0次と1次スペクトルの切り換え方法を説明し、続いて、スリットの選択について説明する。

① 0次と1次スペクトルの切り換え

最初、図 2.1.1 のように ORIHIME 動作ソフトのホルダを開き、動作ソフトを起動する。すると、図 2.1.2 のようなウィンドウが開き、スリットビューワースペクトルが選択できるようになっている。そこで、「スリットビューワ」を選ぶと0次のスペクトルが選択され、観測天体を視野内に導入できるようになる。また「スペクトル」を選ぶと1次のスペクトルが選択され、その天体のスペクトルが撮像できるようになる。

ただし、実際に天体を視野内に導入したり、スペクトルを撮像したりするためには、スリットを選択しなければならない。

② スリットの選択

本分光器では、ZWOのEFWに、フィルターの代わりに、スリットがはめられており、次のようになっている。

- EFW1 : スリットビューワ
- EFW2 : 250 μm スリット
- EFW3 : 75 μm スリット
- EFW4 : 30 μm スリット
- EFW5 : 15 μm スリット

これらを選択するためには、図 2.1.3 のように、まず ASI Studio を起動する。

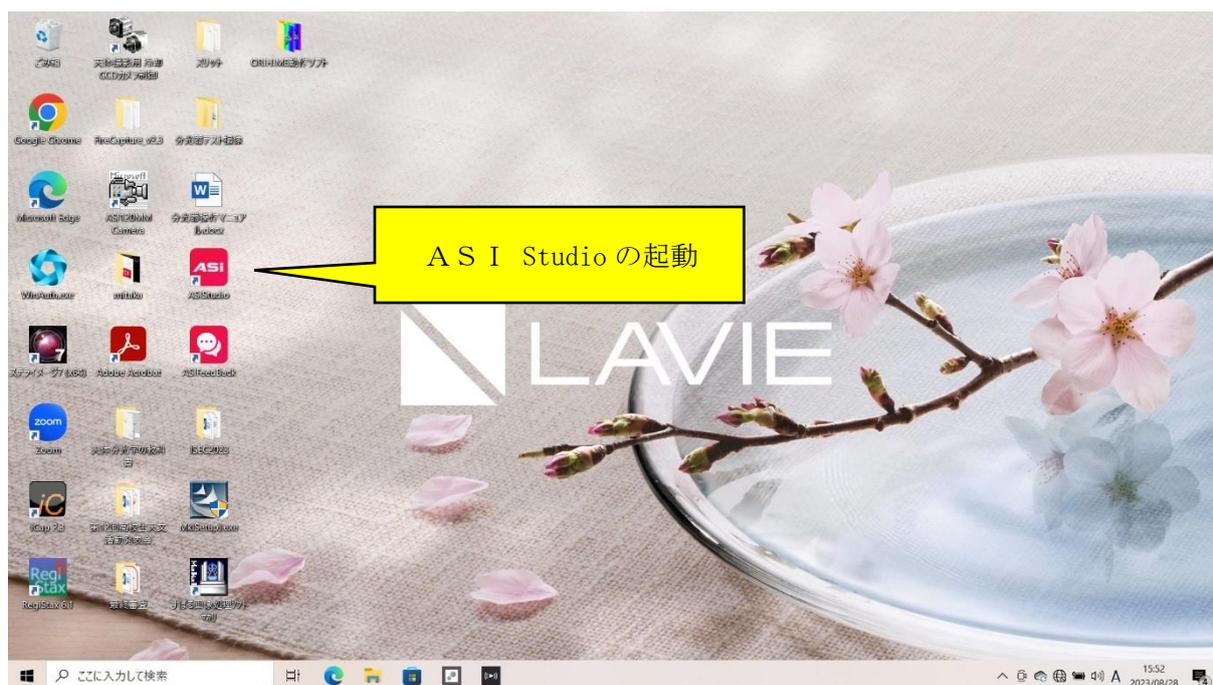


図 2.1.3 ASI Studio の起動

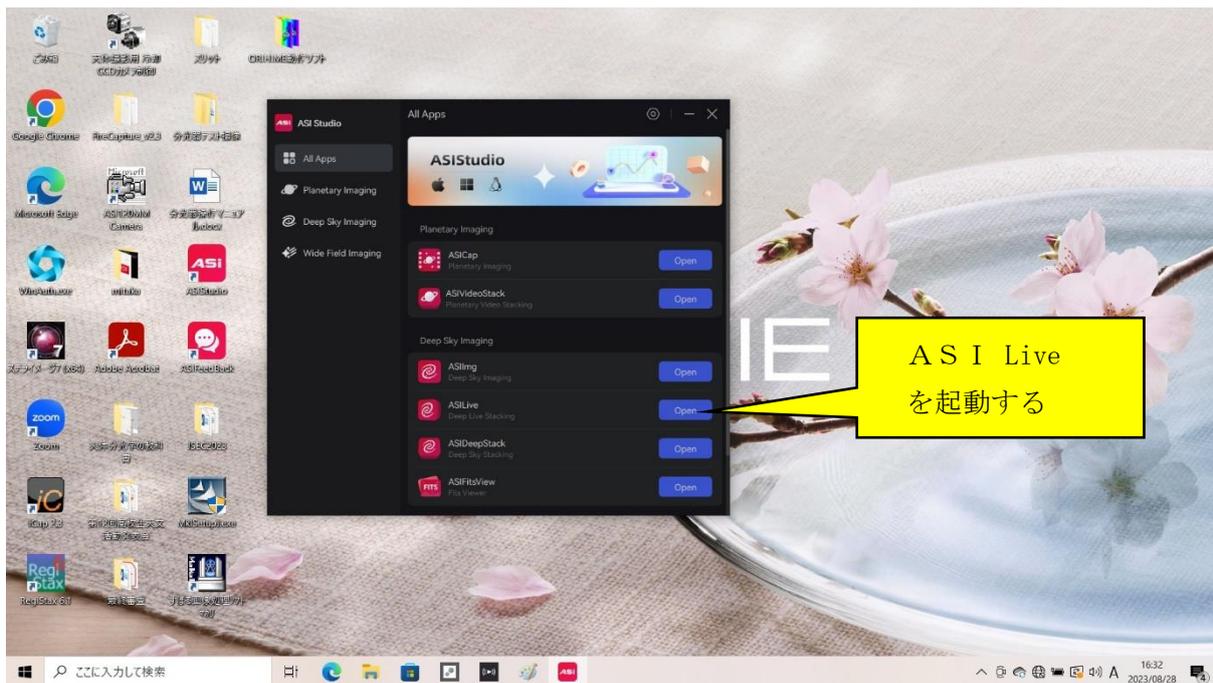


図 2.1.4 AS I Live の起動

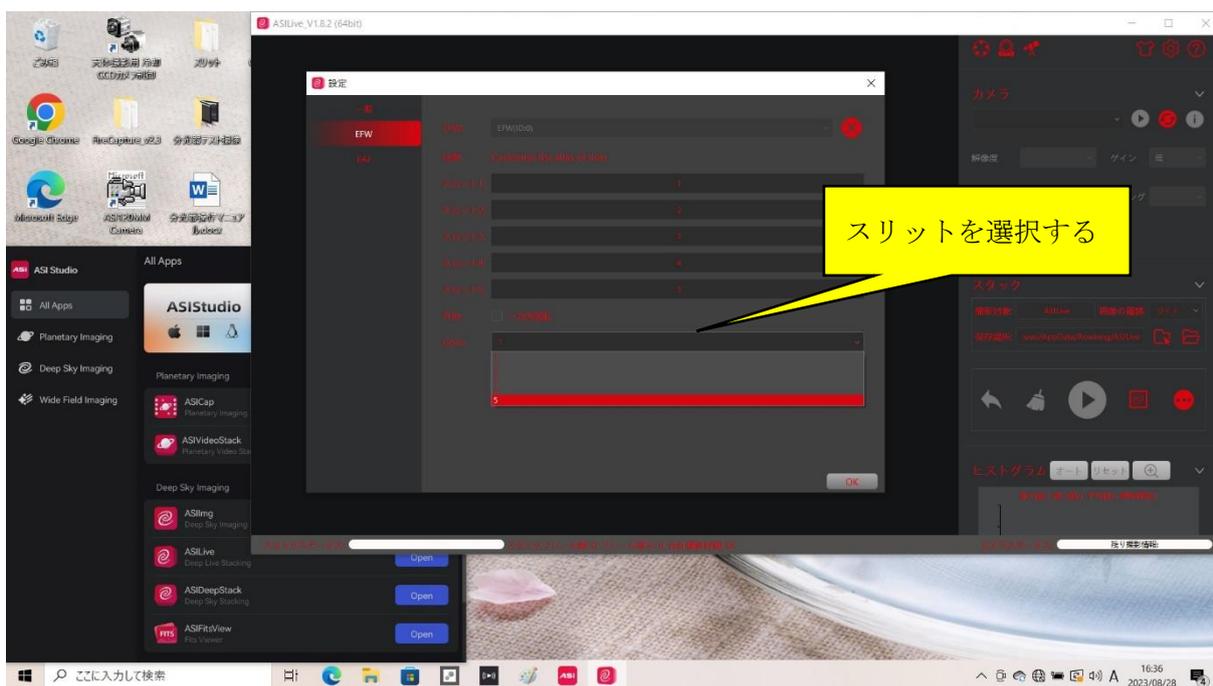


図 2.1.5 スリットの選択

続いて、図 2.1.4 のように、まず AS I Live を起動して、フィルター番号を選択する。

2. 2スペクトルの撮像

① 観測天体の導入

スペクトルを0次のスペクトルに切り換え、スリットをスリットビューワ(EFW1)とする。そして、図2.2.1のように観測天体を視野内に導入し、ヘアライン上の視野中央に合わせる。次に、スリットを250 μm スリット(EFW2)とし、天体がスリットの中央にとらえられていることを確認する。このとき、もしスリットが傾いていたら、カメラを回転させてスリットが画角の縦軸方向と平行になるように調整する。



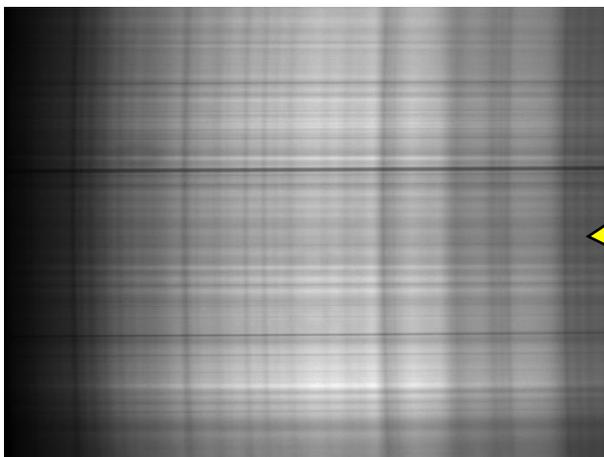
図 2.2.1 スリットビューワ画像
中央の縦線がヘアライン

続いて、スペクトルを1次のスペクトルに設定し、観測に適したスリットを選択する。

- ・75 μm スリット(EFW3)：天体が暗く、長時間露光が必要な観測で使用
- ・30 μm スリット(EFW4)：75 μm と15 μm スリットの中間的な観測で使用
- ・15 μm スリット(EFW5)：視線速度を正確に求めるなど、精度が必要な観測で使用

② 観測天体のスペクトルの撮像

観測天体のスペクトルを撮像する(図2.2.2)。このとき、もしスペクトルの波長の分散方向が画角の横軸に対して傾いていたらスリットと回折格子の溝が平行になっていない証拠である。そこで、スリットに対して回折格子を回転させてスペクトルの分散方向が画角の横軸方向と平行になるように設定する。観測天体のスペクトルの撮像後、そのダーク画像を撮像する。



スペクトルの波長の分散方向が画角の横軸に対して傾いていたらスリットに対して回折格子を回転させてスペクトルの分散方向が画角の横軸方向と平行になるように設定する

図 2.2.2 月のスペクトル画像

③ 波長校正用光源のスペクトルの撮像

波長校正用光源(図 2.2.3)を撮像する。このとき、望遠鏡の方向が変わると接眼部のたわみも変化するため、正しい波長校正ができなくなる。そこで、望遠鏡の駆動装置を一旦停止して、波長校正用光源とそのダークを撮像する。

波長校正用光源が水銀灯とナトリウム灯であった場合、両者の明るさは相当違う。そこで、水銀灯とナトリウム灯を別々に撮像し、後で合成して波長校正用光源画像とする。

波長校正用光源のスペクトルを撮像後、そのダーク画像を撮像する。そして、フラット画像とフラットダーク画像を撮像する。

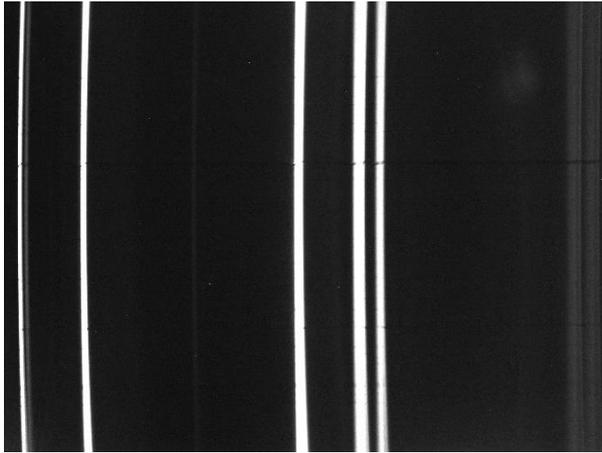


図 2.2.3 波長校正用光源のスペクトル

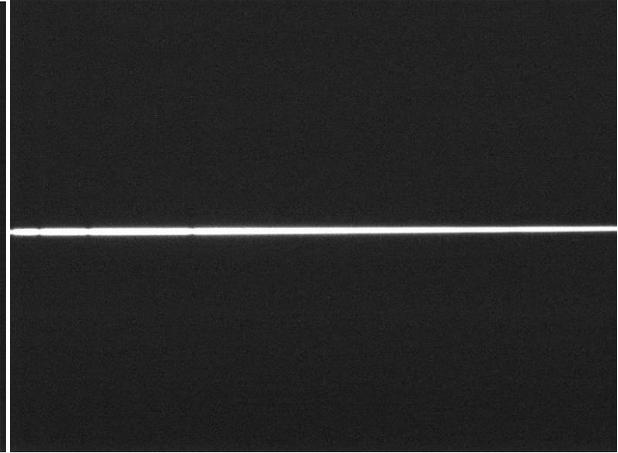


図 2.2.4 分光標準星のスペクトル

2. 3 分光標準星の撮像

① 分光標準星の撮像

観測天体からの光は地球大気を通過しており、そこで吸収・散乱を受けている。地球大気による吸収・散乱は天体からの光が通過した距離、つまり天体の地平高度に依存する。そのため、厳密な分光観測では(特に観測天体の地平高度が低い場合は)、観測天体より地平高度が高い分光標準星と低い分光標準星といったように、複数の分光標準星を選択する必要がある。しかし、大まかなスペクトルの形状がわかれば十分な観測では、観測天体と地平高度が同程度の分光標準星を一つ選択するだけでも良い。

分光標準星のスペクトルの撮像は観測天体の撮像と同じように行う。つまり、スリットをスリットビューワーとして0次のスペクトルに設定する。そして、分光標準星を視野内に導入し、ヘアライン上の視野中央に合わせる。次に、スリットを250 μ mスリットとし、分光標準星がスリットの中央にとらえられていることを確認する。

続いて、スペクトルを1次のスペクトルとし、観測天体と同じスリットを選択して分光標準星のスペクトルを撮像し(図 2.2.4)、スペクトルのダーク画像を撮像する。なお、一般に観測天体と分光標準星の方向は相当異なるので、撮像時の接眼部のたわみも異なると考えられる。そのため、分光標準星においても観測天体と同様に波長校正用光源のスペクトルやフラット画像を撮像する必要がある。

3. 解析方法

3. 1 波長較正

通常、天体のスペクトル画像は、図 2.2 のように横軸を波長の分散方向、縦軸をスリットの長さ方向にとって撮像する。したがって、横軸のピクセル座標 nx が波長の何Åに相当するかを表す換算式を求める必要がある。この換算式を求める操作を「波長較正」という。

波長較正は図 3.1.1 のような観測時に撮像された波長較正用光源のスペクトルを利用して行うが、このスペクトル画像を詳しく見ると光源の輝線がわずかだが短波長側に凸に湾曲している。これは画像の上下端では天体から来た光がスリットに対して斜めに入射することによって生じる現象である。つまり、ピクセル座標を波長 λ に換算する式は、横軸 nx だけではなく縦軸のピクセル座標 ny にも依存した複雑な関数となる。

以下ではマカリィとエクセルを使って、まずスペクトル線の湾曲を無視した平均的な波長較正の換算式を求め、続いて湾曲も考慮した厳密な換算式を求める方法について記述する。

① 波長較正用光源のスペクトル

まず、マカリィで波長較正用光源のスペクトル画像を開く。波長較正用光源として水銀灯とナトリウム灯を別々に撮像した場合は、両方の画像を加算し、それを波長較正用光源画像とする。

水銀灯の輝線スペクトルの波長は短波長側から 4046.56 Å, 4358.35 Å, 5460.74 Å, 5769.59 Å, 5790.65 Å であり、ナトリウム灯の輝線スペクトルの波長は 5892.94 Å^{*} である。（※本分光器ではスリット間隔が 15 μm のスリットを用いない限りナトリウムの D 線の 5895.92 Å と 5889.95 Å が分解できないため平均値を記載した。）なお、ナトリウム灯には希薄なアルゴン気体も封入されているため、その輝線（6965.43 Å, 7067.22 Å, 7383.98 Å, …）が見えることがあり、その場合はそれらも波長較正に利用できる。

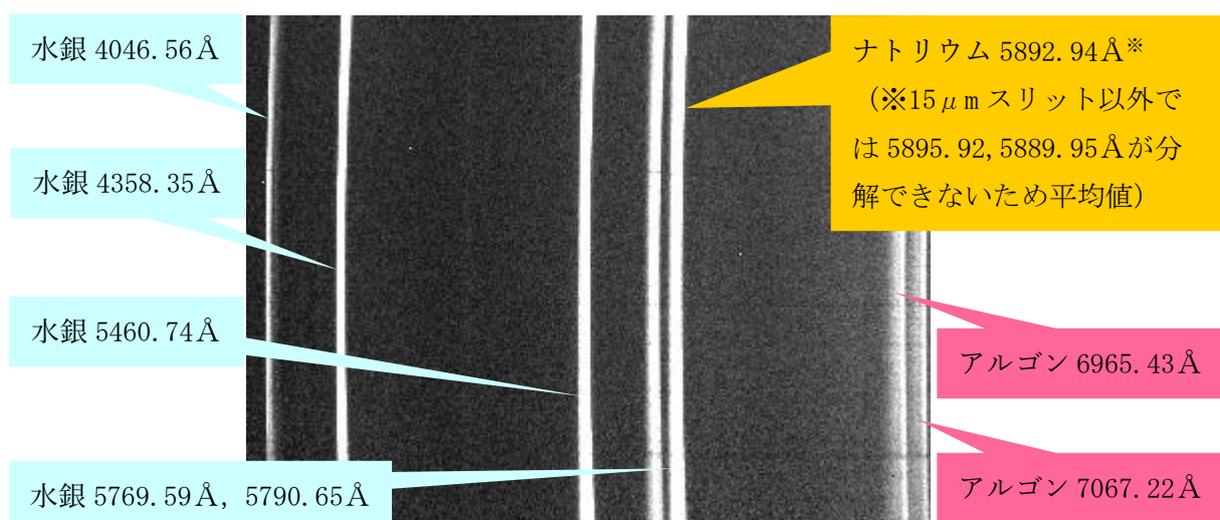


図 3.1.1 波長較正用光源のスペクトル画像

② 波長較正 (その1)

波長較正用光源のスペクトル画像は、図 3.1.1 のようにわずかに短波長側に凸に湾曲している。したがって、精密な測定ではこの湾曲も考慮した波長較正を行う必要がある。

しかし、その作業は多少煩雑であるため、ここでは第 1 ステップとしてスペクトル画像の平均的な波長較正の換算式を求める。

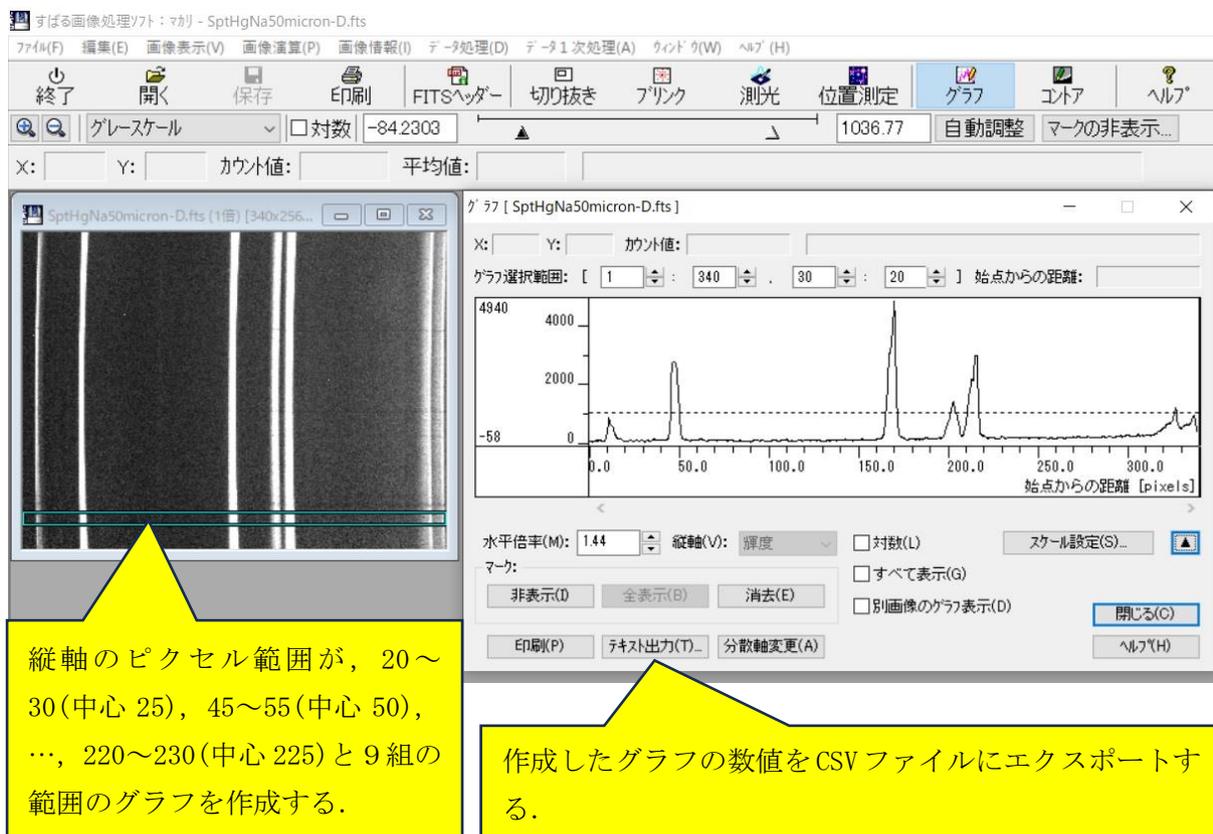


図 3.1.2 マカリィのグラフコマンドでグラフの数値を CSV ファイルにエクスポートする

この例では、波長較正用光源のスペクトル画像の縦軸のピクセル数が 256 ピクセルなので、縦軸のピクセル範囲が、20～30(中心 25), 45～55(中心 50), 70～80(中心 75), …, 195～205(中心 200), 220～230(中心 225)と 9 組の範囲のグラフを作成し、その数値を CSV ファイルにエクスポートする(図 3.1.2)。

続いて、エクセルのファイルを開き、それに先程エクスポートした 9 組のファイルを順に貼りつける(図 3.1.3)。そして、エクセルファイルを見て波長較正用光源の輝線の位置(横軸でのピクセル位置)を探し出し、その場所のセルを着色する(図 3.1.4)。本来ならば輝線の位置はその線輪郭にガウス関数などをあてはめて求めるのが正しいが、ここでは単に最大値の場所を「輝線の位置」とした。

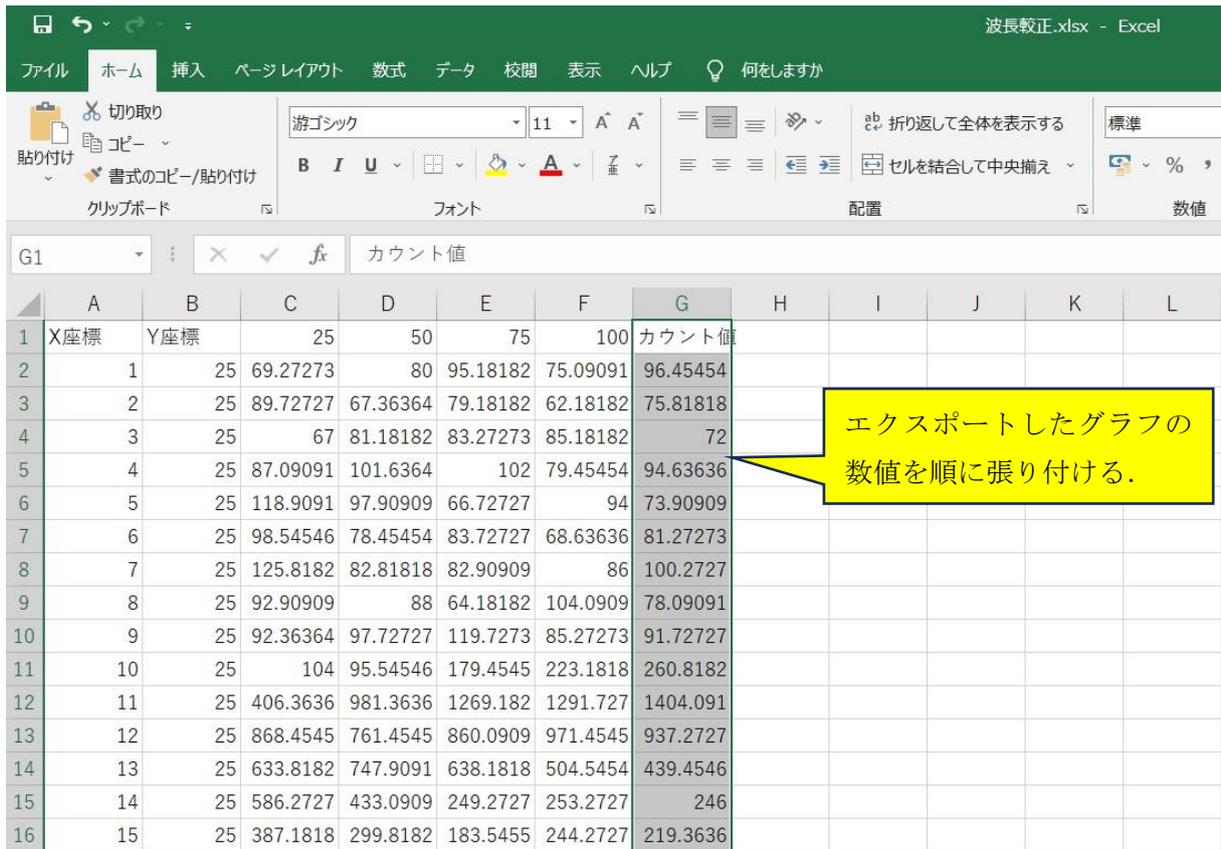


図 3.1.3 エクスポートしたグラフの数値をエクセルファイルに順に張り付ける

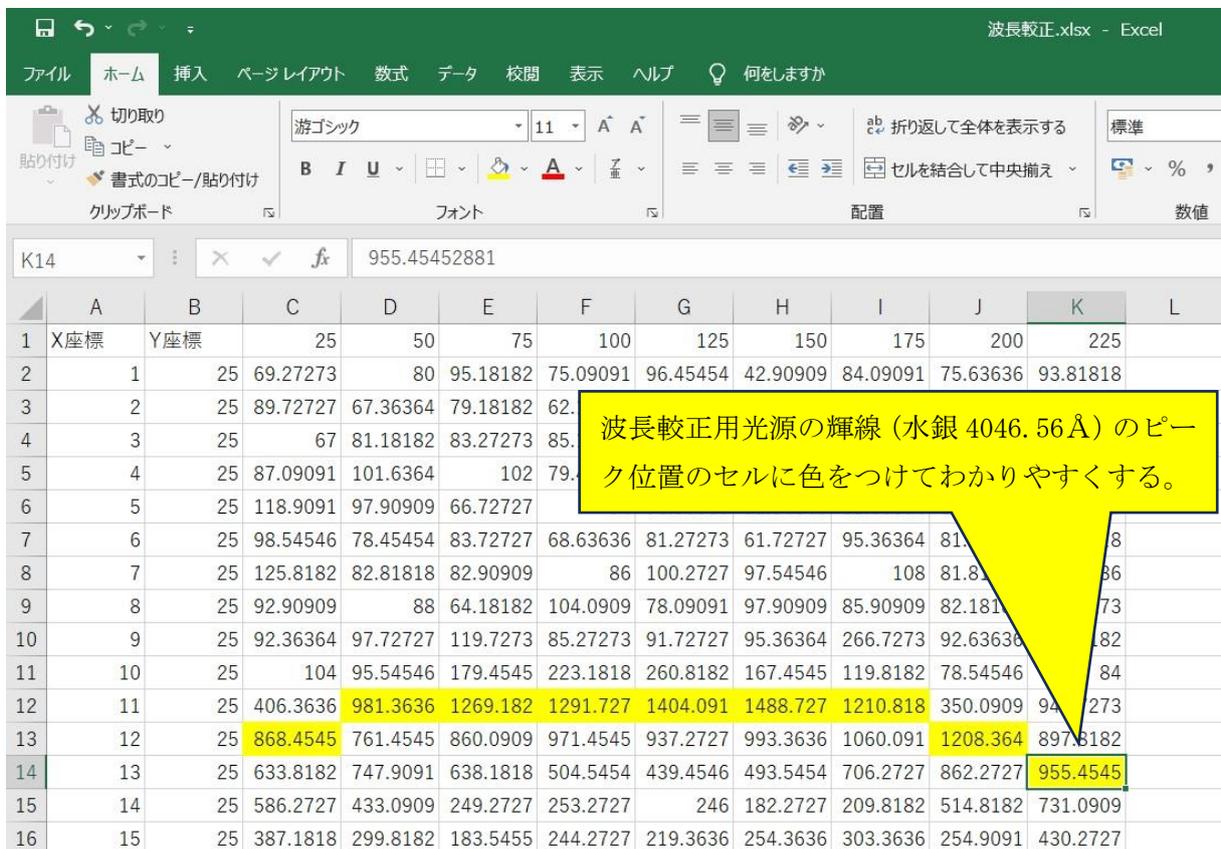


図 3.1.4 波長較正用光源の輝線のピーク位置のセルに色をつける

図 3.1.4 より，明らかに輝線の位置は短波長側（横軸のピクセル座標 nx の小さい側）に凸に湾曲している．そこで，各波長校正用光源の輝線の位置を表にまとめ，その平均値を求める（図 3.1.5）．次に，先程求めた輝線の位置の平均値を横軸に，その波長を縦軸にとってグラフ化する．するとほとんど直線状のグラフが得られるが，これがスペクトル画像の平均的な波長校正の換算曲線である．このことから本分光器の波長分散がほぼ線形であることがわかる（図 3.1.6）．

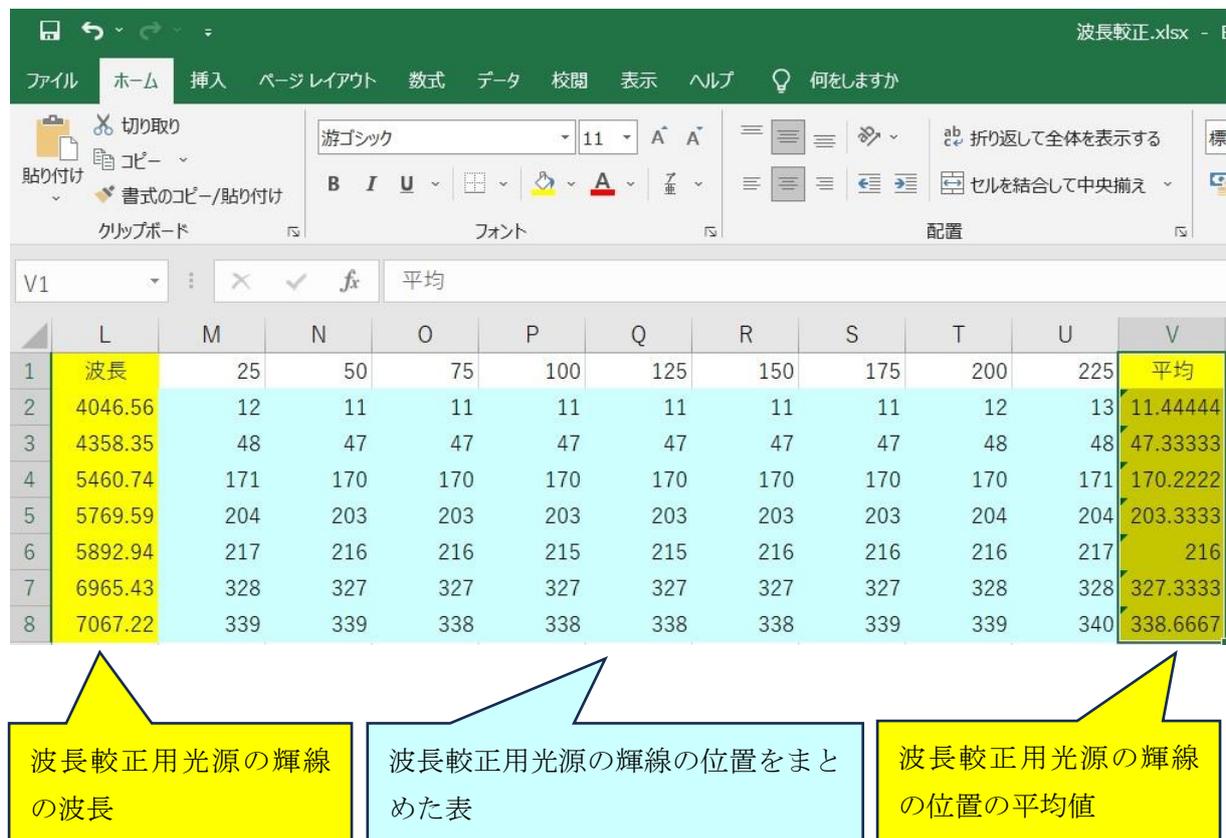


図 3.1.5 波長校正用光源の輝線のピーク位置を表にまとめてその平均値を求める

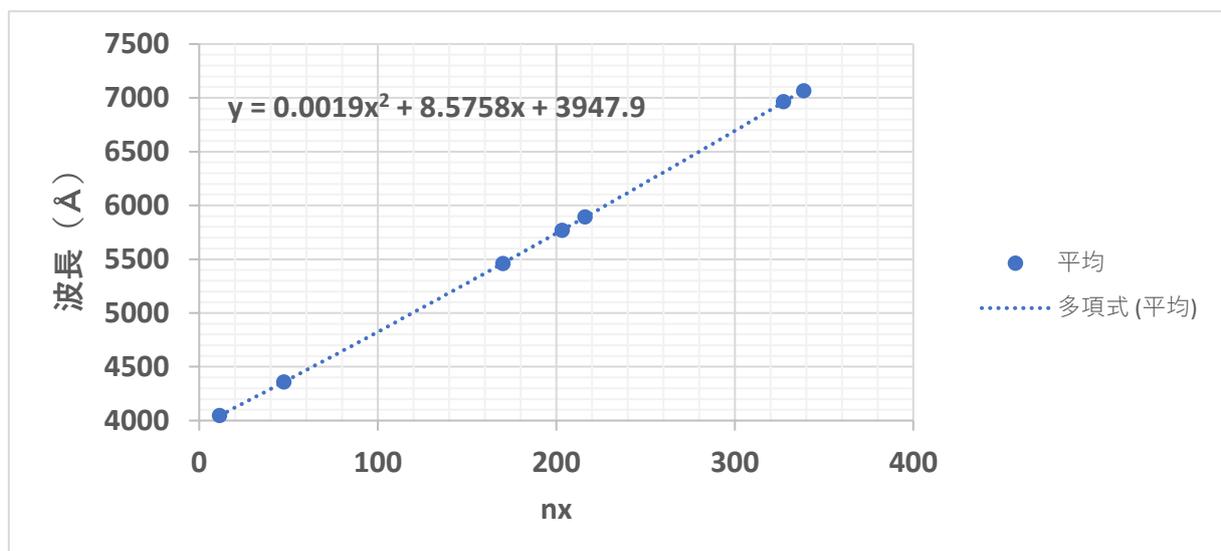


図 3.1.6 輝線の位置の平均値を横軸に，その波長を縦軸にとったグラフ

しかし、このグラフを詳細に調べると、わずかだが直線からのずれが存在することがわかる。そこで、換算式を nx の 1 次方程式から 2 次方程式に次数を上げると、そのずれは画期的に減少し、十分な精度で波長と横軸のピクセル座標 nx の関係を表すことができる。これが平均的な波長較正の換算式である。

今回求めた平均的な波長較正の換算式を (1) 式に示す。

$$\lambda = An_x^2 + Bn_x + C_0 \quad \cdots (1)$$

ただし、 $A=0.0019\text{\AA}$ 、 $B=8.5758\text{\AA}$ 、 $C_0=3947.9\text{\AA}$ である。

③ 波長較正 (その 2)

(1) 式はあくまでスペクトル画像の平均的な波長較正の換算式にすぎない。図 3.1.1 を見ても、明らかに波長較正用光源のスペクトルは短波長側に凸に湾曲している。そこで、第 2 ステップとしてスペクトル線の湾曲も考慮した換算式を求める。

	W	X	Y	Z	AB	AC	AD	AE	AF	AG
1	平均	25	50	75	100	125	150	175	200	225
2	11.44444	0.555556	-0.44444	-0.44444	-0.44444	-0.44444	-0.44444	0.555556	1.555556	
3	47.33333	0.666667	-0.33333	-0.33333	-0.33333	-0.33333	-0.33333	0.666667	0.666667	
4	170.2222	0.777778	-0.22222	-0.22222	-0.22222	-0.22222	-0.22222	-0.22222	0.777778	
5	203.3333	0.666667	-0.33333	-0.33333	-0.33333	-0.33333	-0.33333	0.666667	0.666667	
6	216	1	0	0	-1	-1	0	0	0	1
7	327.3333	0.666667	-0.33333	-0.33333	-0.33333	-0.33333	-0.33333	0.666667	0.666667	
8	338.6667	0.333333	0.333333	-0.66667	-0.66667	-0.66667	-0.66667	0.333333	0.333333	1.333333
9	平均	0.666667	-0.19048	-0.33333	-0.47619	-0.47619	-0.33333	-0.19048	0.380952	0.952381
10										

図 3.1.7 波長較正用光源の輝線の位置からその平均値を引いた値の表

まず、図 3.1.7 のようにエクセルで波長較正用光源の輝線の位置からその平均値を引いた表を作成し、そのグラフを描く(図 3.1.8)。すると、図 3.1.8 の横軸は画像のスリット方向のピクセル座標 ny で縦軸は各波長較正用光源の輝線スペクトルの湾曲(平均値からのずれ)のグラフとなっている。

図 3.1.8 から、各波長較正用光源の輝線の湾曲には (nx に依存した) 系統的なずれはなく、それらの位置は同じ ny の 2 次曲線上にあり、その曲線からのずれはあくまで輝線位置の読み取り誤差で、 ± 0.5 ピクセル程度と推測できる*。(※波長に換算すると約 5\AA の誤差)

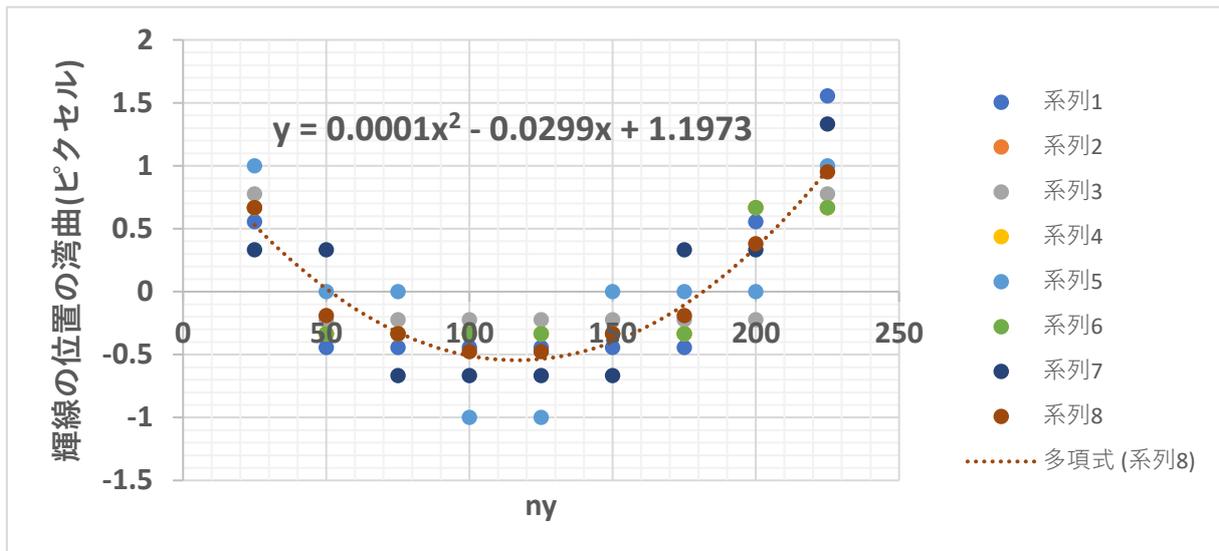


図 3.1.8 スリットの長さ方向のピクセル座標を横軸に輝線位置の湾曲を縦軸にとったグラフ

したがって、輝線位置の湾曲は、 nx には依存せず、(2)式のようにあらわせる。

$$\lambda = an_y^2 + bn_y + c \quad \cdots (2)$$

ただし、 $a=0.0001 \text{ \AA}$ 、 $b= -0.0299 \text{ \AA}$ 、 $c=1.1973 \text{ \AA}$ である。

以上のことから、スペクトル画像の平均的な波長較正の換算式は(1)式で与えられ、平均からのずれ(すなわちスペクトル線の湾曲)は(2)式で与えられることから、求める波長較正の換算式は、(3)式で与えられることが分かる。

$$\lambda = An_x^2 + Bn_x + C_0 + an_y^2 + bn_y + c \quad \cdots (3)$$

ただし、 $A=0.0019 \text{ \AA}$ 、 $B=8.5758 \text{ \AA}$ 、 $C_0=3947.9 \text{ \AA}$ 、 $a=0.0001 \text{ \AA}$ 、 $b= -0.0299 \text{ \AA}$ 、 $c=1.1973 \text{ \AA}$ である。

④ M57 の輝線スペクトルの波長の測定

以下では、波長較正で求めた換算式を使い、惑星状星雲 M57 の輝線スペクトルの波長を求める。惑星状星雲からは、電離した酸素や窒素の禁制線に加えて水素のバルマー線の輝線が見えることが知られている。

図 3.1.9 に M57 のスペクトル画像を示す。この画像をマカリィで読み込み、図 3.1.10 のように縦軸のピクセル範囲が 125~155(中心 140)の範囲のグラフを作成し、その数値を CSV ファイルにエクスポートする。そして、グラフ上で輝線がピークとなる位置のピクセル座標(nx , ny)を(3)式に代入すると輝線スペクトルの波長が求まる。なお、この観測は $30 \mu\text{m}$ のスリットを用いて行ったため $\pm 10 \text{ \AA}$ の波長測定誤差があることを忘れてはいけない。

その結果、波長 $4967 \pm 6 \text{ \AA}$ の輝線は $[\text{OIII}]4959\text{\AA}$ 、 $5012 \pm 6 \text{ \AA}$ の輝線は $[\text{OIII}]5007\text{\AA}$ 、 $6555 \pm 6 \text{ \AA}$ の輝線は $[\text{NII}]6548\text{\AA}$ 、 $6584 \pm 6 \text{ \AA}$ の輝線は $[\text{NII}]6584\text{\AA}$ であると推測される。

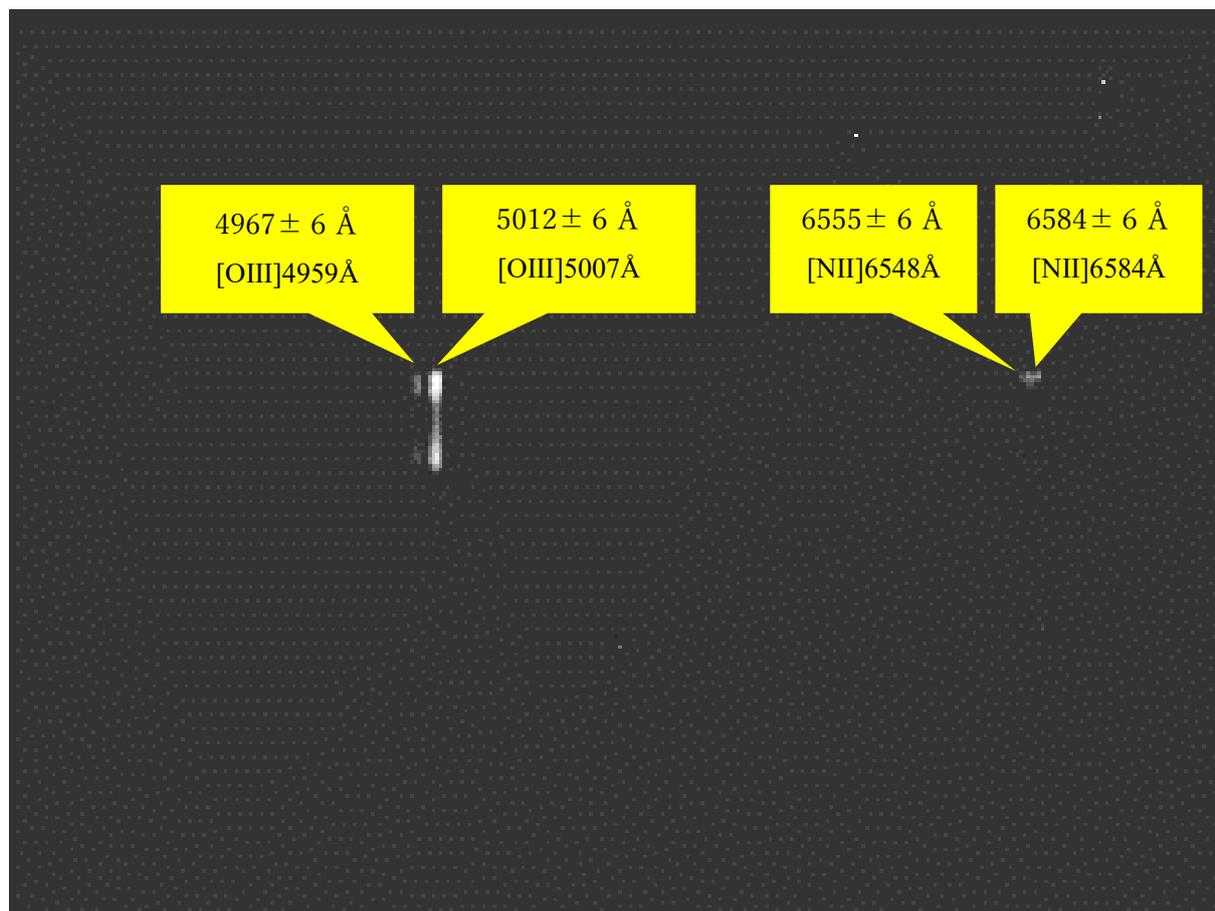


図 3.1.9 M57 のスペクトル画像

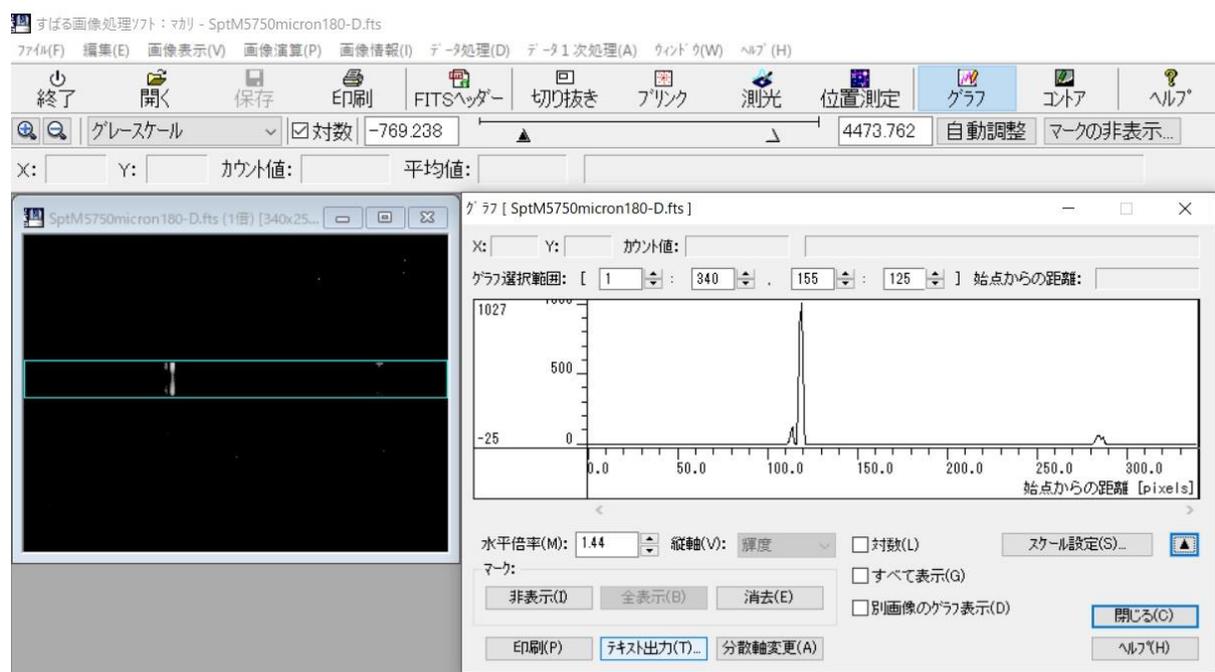


図 3.1.10 縦軸の範囲が 125~155(中心 140)の範囲のグラフを CSV ファイルにエクスポート

3.2 波長感度補正

撮像された天体のスペクトルは、ダーク画像を減算することにより CCD の暗電流を除去し、フラット画像で割り算することにより光学系の周縁減光や CCD の感度むらなどを補正する。

しかし、フラット画像は通常ハロゲンランプなどの光を白板に反射させて撮像するため、天体のスペクトルの波長依存性とその影響を受けることになる。そのため、天体のスペクトルの波長依存性を正しい分布に補正する必要がある。この補正のことをスペクトルの「波長感度補正」という。

スペクトルの波長感度補正は、観測時に観測対象となった天体の近傍にある「分光標準星」を撮像し、それを既知のスペクトル強度と比較して波長ごとの補正係数を求め、その補正係数を観測対象の天体のスペクトルにかけることによって行う。

なお、分光標準星とは長年の観測でスペクトルが時間変動しないことが分かっている、波長ごとのスペクトルの強度が精密に測定され数値化されている恒星のことであり、そのスペクトルデータは、例えば ESO (European Southern Observatory) の分光測光標準星スペクトルデータベース

<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html> を利用すると入手できる。

しかし、分光標準星のデータベースに掲載されているスペクトルデータと我々が観測で波長付けしたスペクトルでは一般に波長の値も波長のステップも異なっている。そのため、波長ごとの補正係数を求める際に相当煩雑な作業を行わねばならなくなる。

このとき、グラフを自動で読み取り数値化するソフト「Graphcel」を利用するとスペクトルの波長感度補正が非常に簡単に行える。Graphcel はフリーのソフトであり、簡単に入手できる。そこで、以下では Graphcel を用いたスペクトルの波長感度補正について紹介する。

① ESO の分光測光標準星のデータベースを開く。

Star Name	RA (J2000)	Dec	V Mag	Bmag	Filter
HD157	00 02 49.42	-19 12 59.0	9.12	8.122	
HD158	00 39 54.32	-12 07 57.1	14.49	10.0	
HD159	00 36 55.20	+19 53 49.9	9.46	8.229	
SD-548242	00 41 46.82	+10 39 55.8	11.23	F	
HD160	00 50 52.20	+54 52 17.4	16.20	15.2	Std.
HD161	01 51 58.80	+41 20 26.7	11.20	B	
HD162	02 39 58.24	+49 37 56.2	6.20	NA111	
HD163	03 10 50.98	+48 56 52.2	11.24	DA	
HD164	03 49 22.17	+19 58 33.8	12.24	F	
HD165	03 49 50.08	+10 50 50.4	14.24	DA2	
HD166	03 59 43.87	+10 34 52.0	16.24	DA	
HD167	02 58 25.70	+12 47 25.7	14.24	DA4	
HD168	04 20 25.76	+17 07 54.4	13.24	DA4	
HD169	04 12 40.51	+13 51 50.4	13.24	DA3	
HD170	04 50 56.69	+10 51 50.7	6.24	DA7	
HD171	05 52 27.51	+10 33 56.4	13.24	DA1	
HD172	00 02 50.40	+49 18 50.0	11.24	Std.	
HD173	02 42 54.42	+10 10 25.4	5.17	DA9	
HD174	08 56 24.33	+21 51 25.5	12.24		
HD175	08 49 13.33	+10 58 14.1	10.44	DA	
HD176	08 49 54.84	+44 18 52.9	6.32	DA	Std.
HD177	07 39 27.24	+60 39 58.7	6.32	DA20	Std.
HD178	+23 51 20.44	+10 39 56.7	13.24		

比較的明るい分光標準星が赤経の順でリストアップされている。

図 3.2.1
ESO の分光測光標準星データベース

②ESO の分光測光標準星データベースから適当な分光標準星を選択する。

例として「おおぐま座γ星 (HR4554)」を選択し、ここをクリックするとデータの FTP サイトに飛べる※。

※星によっては FTP サイトに飛べないものがある。その場合いったん①に戻り、カシオペア座α星 (HR153) かくじら座α2星 (HR718) を選択すれば③の FTP サイトに飛べる。

図 3.2.2

例としておおぐま座γ星を選択

③適当な分光標準星を選択する。

おおぐま座γ星を意味する「fhr4554.dat」をクリックする。「f」はフラックスの意

図 3.2.3

例としておおぐま座γ星を選択

④おおぐま座γ星のスペクトルデータが表示される。

おおぐま座γ星のスペクトル。左は波長 (Å), 中央は $\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{\AA} \times 10^{16}$ 単位の, 右はミリジャンスキー単位のスペクトルのエネルギーフラックスであ

図 3.2.4

おおぐま座γ星のスペクトルデータ

⑤数値表を Windows アクセサリの「メモ帳」にコピー，保存する。

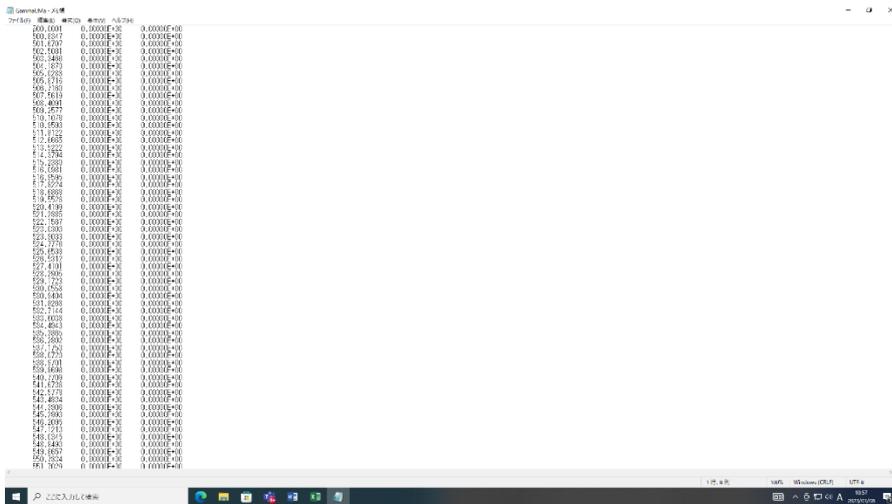


図 3.2.5
おおぐま座 γ 星のスペクトルを「メモ帳」にコピー

⑥「メモ帳」で保存したテキストファイルをエクセルで開く。

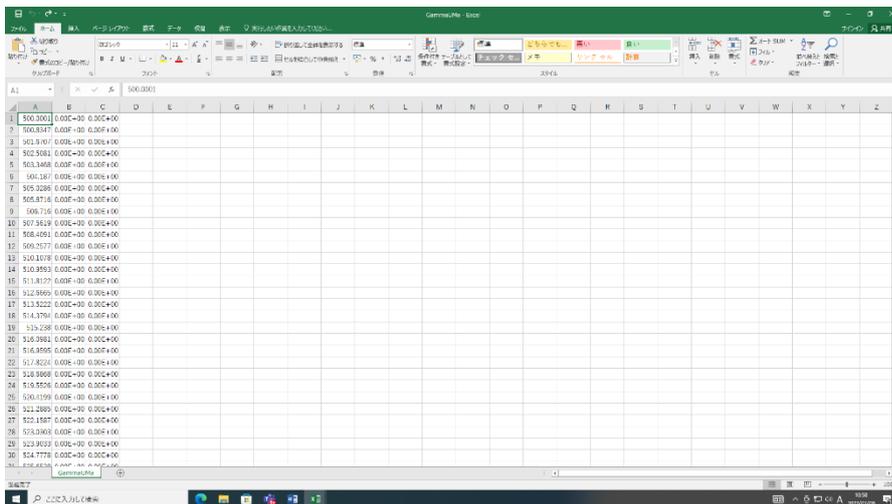


図 3.2.6
メモ帳で保存したテキストファイルをエクセルで開く

⑦エクセルで横軸が波長，縦軸がスペクトル強度のグラフを描く。このとき，横軸の波長の範囲は観測での波長の範囲に合わせておく。

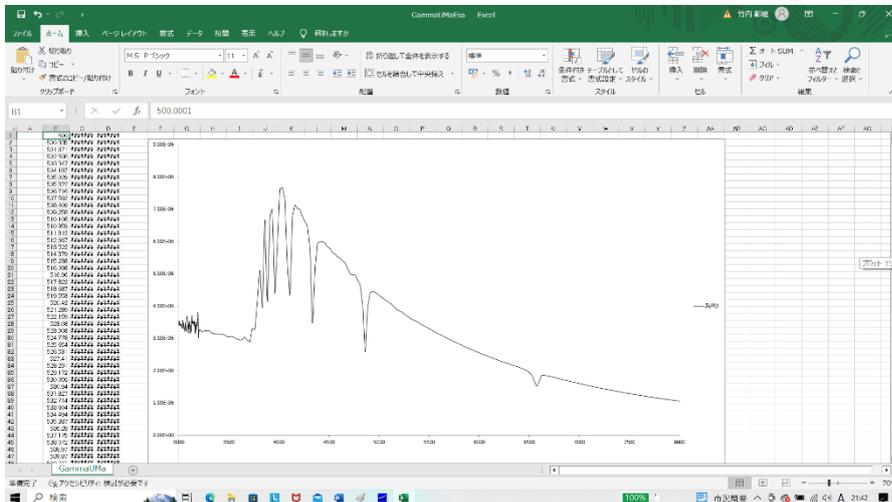


図 3.2.7
エクセルでスペクトルデータのグラフを描画

⑧描いたグラフを Windows アクセサリの「ペイント」に張り付ける。

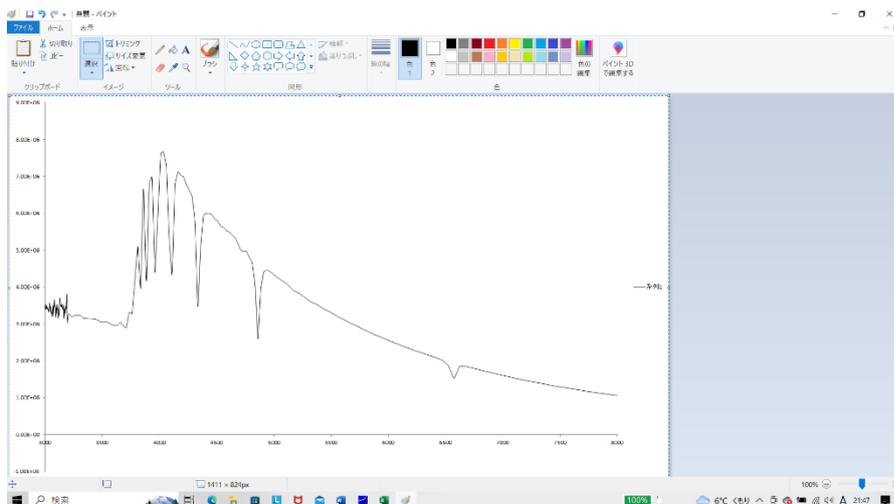


図 3.2.8
エクセルのグラフをペ
イントに張り付け

⑨ペイントの「図形の選択」で「四角形選択」を選び、下図のようにグラフの部分だけを選択し、jpg ファイルとして保存する。

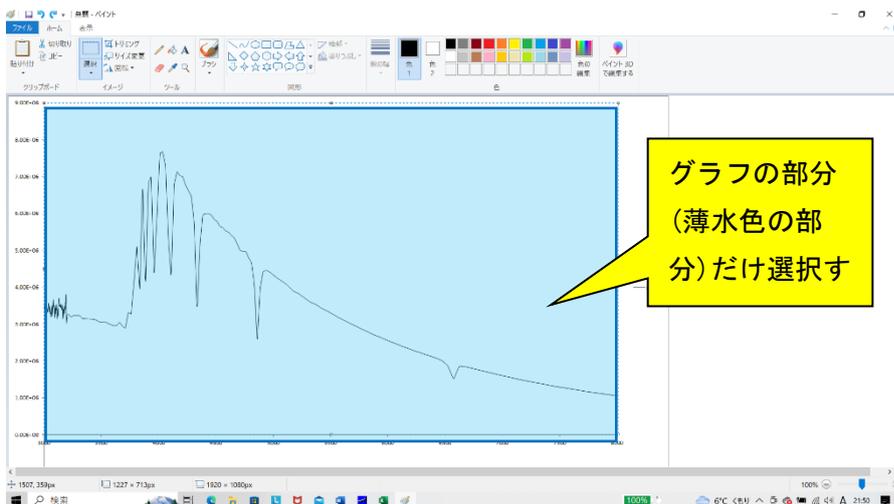


図 3.2.9
グラフの部分だけ選択

⑩保存した jpg ファイルを Graphcel で開く。グラフの横軸の「最大値(Å)」、「最小値(Å)」、「横軸方向の分割数」、「縦軸の最大値」、「最小値」を入力し、グラフを数値化する。

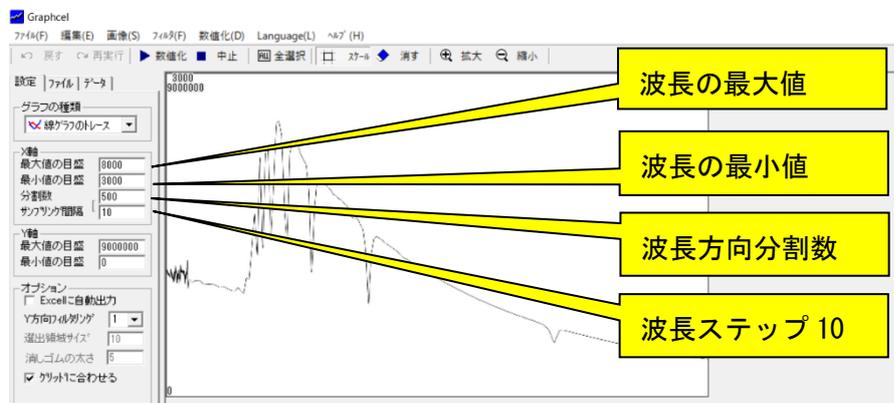


図 3.2.10
Graphcel の操作画面

⑪数値は自動でエクセルファイルにエクスポートされるので、そのファイルに適切な名称（ここでは GammaUMaESO.xls）を付けて保存する。

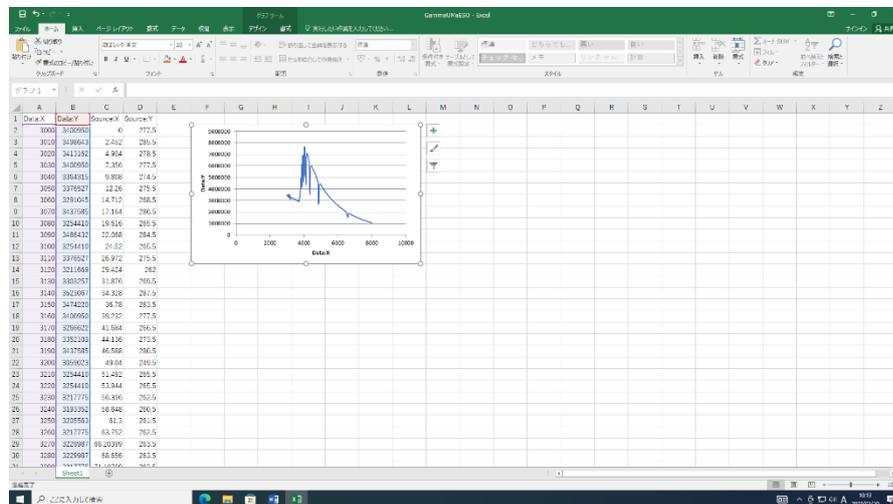


図 3.2.11
上 : Graphcel でグラフ
を数値化
下 : 数値化したエクセル
ファイル

⑫続いて、観測時に撮像し、ダーク・フラット処理を行った分光標準星のスペクトルのグラフを描く。

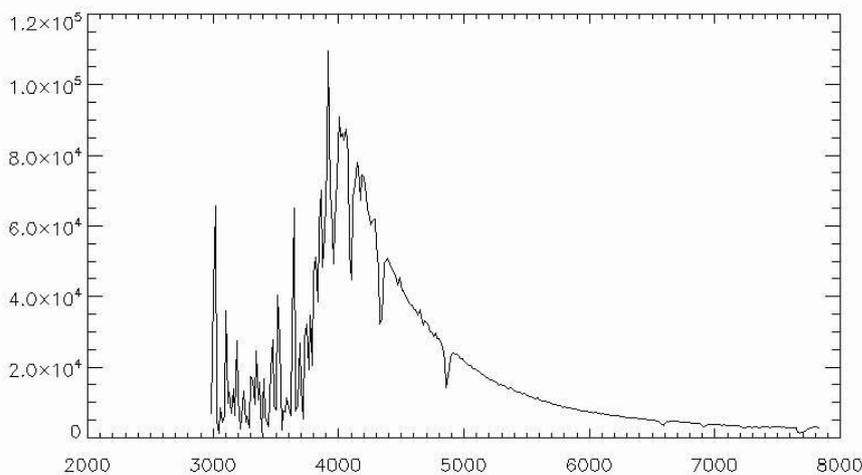


図 3.2.12
観測した分光標準星の
スペクトルのグラフ

⑬描いたグラフを「ペイント」の画面に張り付ける

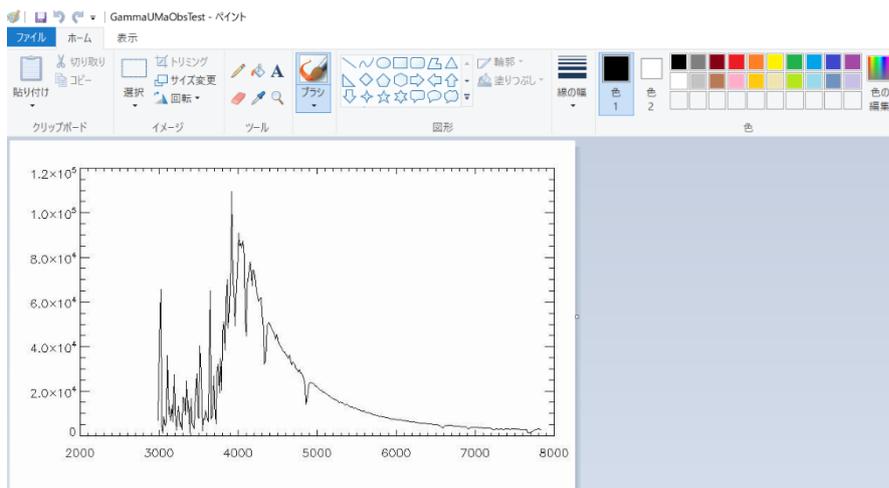


図 3.2.13
グラフをペイントに張り付け

⑭ペイントの「図形の選択」で「四角形選択」を選び、下図のようにグラフの部分だけを選択し、jpg ファイルとして保存する。

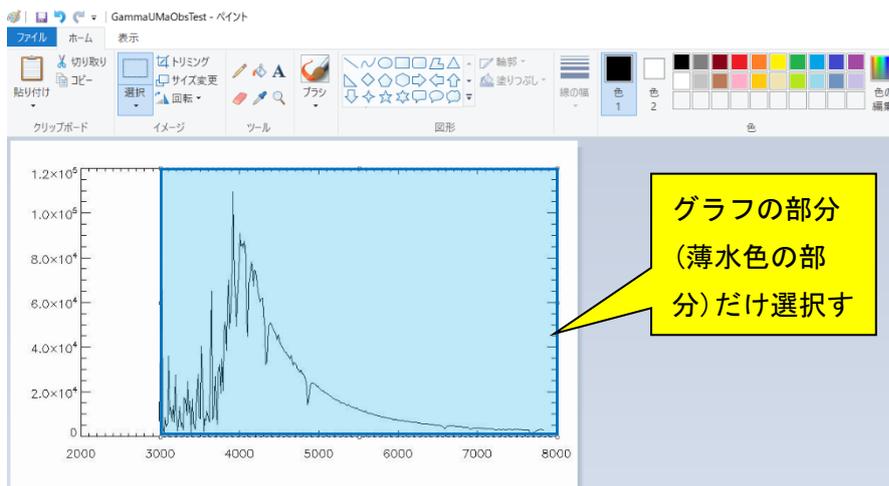


図 3.2.14
グラフの部分だけ選択

⑮jpg ファイルを Graphcel で開き、グラフの横軸の「最大値(Å)」、「最小値(Å)」、「横軸方向の分割数」、「縦軸の最大値」、「最小値」を入力し、グラフを数値化する。ただし、横軸の最大値、最小値、横軸方向の分割数は先程と同じ値にする。

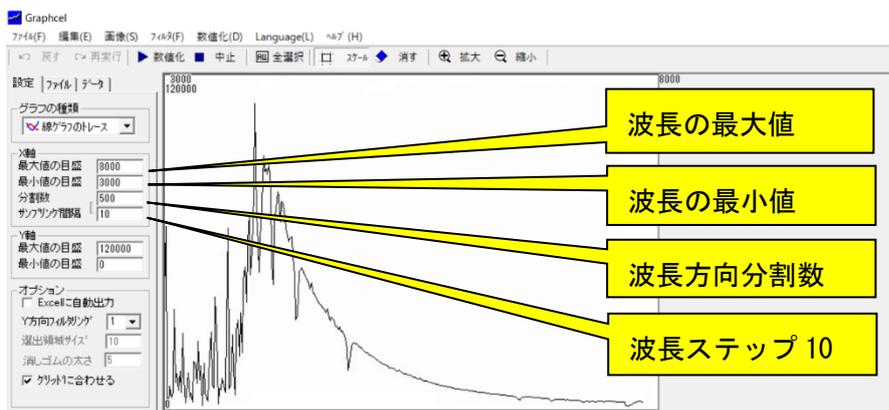


図 3.2.15
Graphcel の操作画面

⑩数値は自動でエクセルファイルにエクスポートされるので、そのファイルに適切な名称（ここでは GammaUMaObs.xls）を付けて保存する。

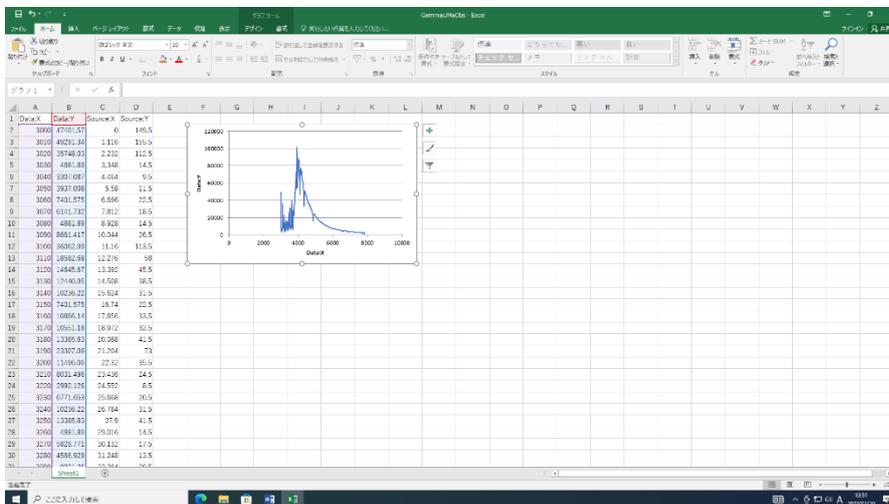
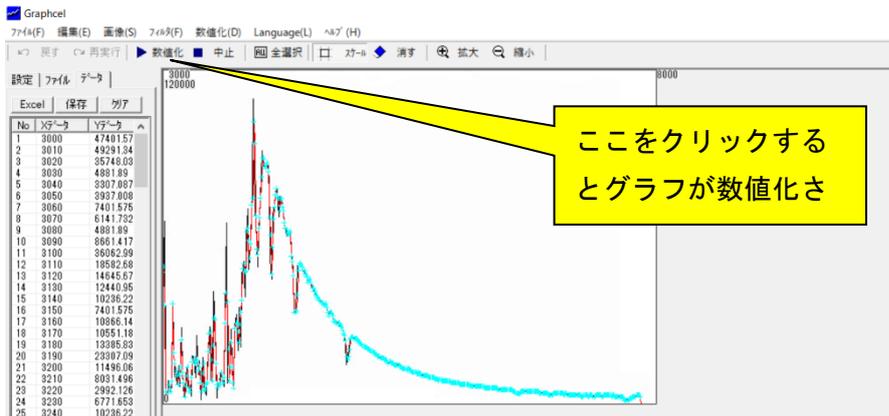


図 3.2.16
上：Graphcel でグラフを数値化
下：数値化したエクセルファイル

⑰GammaUMaESO.xls と GammaUMaObs.xls を合体させて、スペクトル強度の比をとり、波長ごとの補正係数を求める。

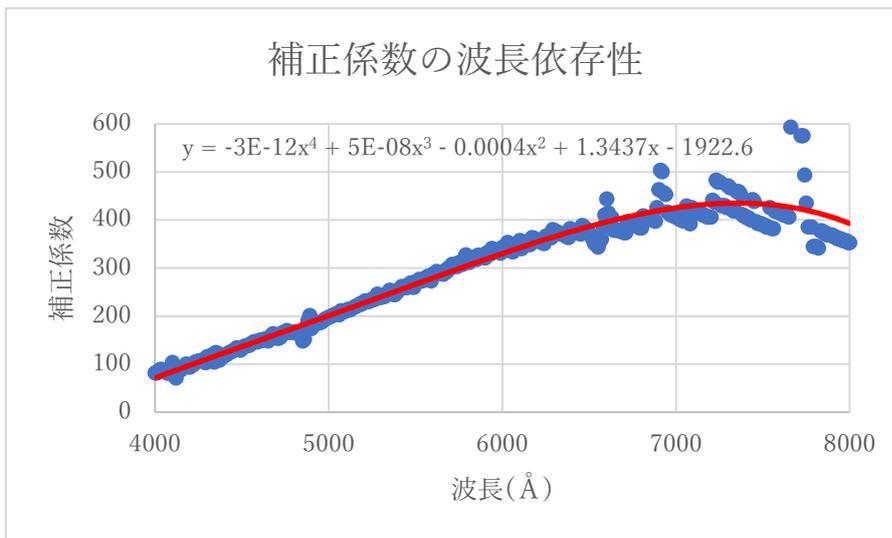


図 3.2.17
補正係数の波長依存性
赤線は近似曲線

⑬波長感度補正の例

以下、波長感度補正の例を示す。図 3.2.18 は撮像した満月のスペクトルに波長感度補正を行ったものである。月は太陽光を反射しているため、太陽と同じく 5000Å 付近にピークがあり、5800K の黒体放射に近いスペクトルであることが分かる。

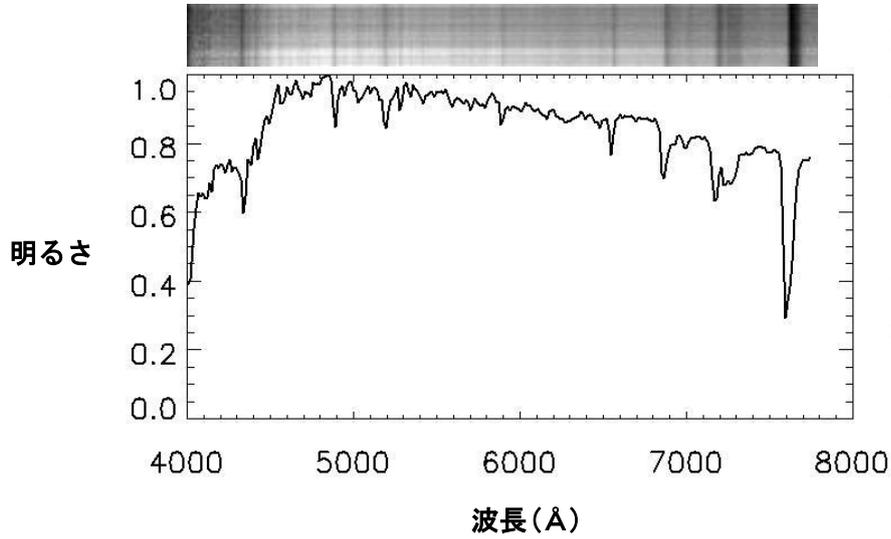


図 3.2.18

満月のスペクトル。
月は太陽光を反射しているため太陽と同じく 5000Å 付近にピークがあり 5800K に近いスペクトルとなっている。

4. 付録

4. 1 分光標準星一覽

HR9087	00 01 49.42	-03 01 39.0	5.12	B7III	
G15B-100	00 33 54.32	-12 07 57.1	14.89	dG-K	
HR153	00 36 58.30	+53 53 48.9	3.66	B2IV	ζ Cas
CD-34d241	00 41 46.92	-33 39 08.5	11.23	F	†
BPM16274	00 50 03.18	-52 08 17.4	14.20	DA2	Mod.
LTT1020	01 54 49.68	-27 28 29.7	11.52	G	
HR718	02 28 09.54	+08 27 36.2	4.28	B9III	ξ² Cet
EG21	03 10 30.98	-68 36 02.2	11.38	DA	
LTT1788	03 48 22.17	-39 08 33.6	13.16	F	
GD50	03 48 50.06	-00 58 30.4	14.06	DA2	
SA95-42	03 53 43.67	-00 04 33.0	15.61	DA	
HZ4	03 55 21.70	+09 47 18.7	14.52	DA4	
LB227	04 09 28.76	+17 07 54.4	15.34	DA4	
H22	04 12 43.51	+11 51 50.4	13.86	DA3	
HR1544	04 50 36.69	+08 54 00.7	4.36	A1V	π² Ori
GD71	05 52 27.51	+15 53 16.6	13.03	DA1	
G191-B2B	05 05 30.62	+52 49 54.0	11.78	DA1	
HR1996	05 45 59.92	-32 18 23.4	5.17	O9V	Mod.
LTT2415	05 56 24.30	-27 51 28.8	12.21		
HILT600	06 45 13.33	+02 08 14.1	10.44	B1	
HD49798	06 48 04.64	-44 18 59.3	8.30	O6	Mod.
HD60753	07 33 27.26	-50 35 03.7	6.70	B3IV	Mod.
G193-74	07 53 27.40	+52 29 35.7	15.70	DA0	
BD+75d325	08 10 49.31	+74 57 57.5	9.54	O5p	
LTT3218	08 41 32.37	-32 56 32.9	11.86	DA	
HR3454	08 43 13.46	+03 23 55.1	4.30	B3V	η Hyd
AGK+81d266	09 21 19.06	+81 43 28.6	11.92	sdO	
GD108	10 00 47.33	-07 33 31.2	13.56	sdB	
LTT3864	10 32 13.90	-35 37 42.4	12.17	F	
Feige34	10 39 36.71	+43 06 10.1	11.18	D0	
HD93521	10 48 23.51	+37 34 12.8	7.04	O9Vp	
HR4468	11 36 40.91	-09 48 08.2	4.70	B9.5V	θ Crt
LTT4364	11 45 42.92	-64 50 29.5	11.50	C2	
HR4554	11 53 49.83	+53 41 41.1	2.44	A0V	Mod. γ UMa

Feige56	12 06 47.25	+11 40 12.7	11.06	B5p	
HZ21	12 13 56.42	+32 56 30.8	14.68	DO2	
Feige66	12 37 23.55	+25 04 00.3	10.50	sdO	
LTT4816	12 38 50.94	-49 47 58.8	13.79	DA	
Feige67	12 41 51.83	+17 31 20.5	11.81	sdO	
GD153	12 57 02.37	+22 01 56.0	13.35	DA1	
G60-54	13 00 09.53	+03 28 55.7	15.81	DC	
HR4963	13 09 56.96	-05 32 20.5	4.38	A1IV	
HZ43	13 16 21.99	+29 05 57.0	12.91	DA1	
HZ44	13 23 35.37	+36 08 00.0	11.66	sdO	
GRW+70d5824	13 38 51.77	+70 17 08.5	12.77	DA3	
HR5191	13 47 32.44	+49 18 48.0	1.86	B3V	Mod.
CD-32d9927	14 11 46.37	-33 03 14.3	10.42	A0	
HR5501	14 45 30.25	+00 43 02.7	5.68	B9.5V	
LTT6248	15 39 00.02	-28 35 33.1	11.80	A	
BD+33d2642	15 51 59.86	+32 56 54.8	10.81	B2IV	
EG274	16 23 33.75	-39 13 47.5	11.03	DA	
G138-31	16 27 53.59	+09 12 24.5	16.14	DC	
LTT7379	18 36 26.29	-44 18 33.0	10.23	G0	
HR7001	18 36 56.33	+38 47 01.1	0.00	A0V	
HR7596	19 54 44.80	+00 16 24.6	5.62	A0III	
LTT7987	20 10 57.38	-30 13 01.2	12.23	DA	
G24-9	20 13 56.05	+06 42 55.2	15.72	DC	
HR7950	20 47 40.55	-09 29 44.7	3.78	A1V	
LDS749B	21 32 15.75	+00 15 13.6	14.67	DB4	
BD+28d4211	21 51 11.07	+28 51 51.8	10.51	Op	
G93-48	21 52 25.33	+02 23 24.3	12.74	DA3	
BD+25d4655	21 59 42.02	+26 25 58.1	9.76	O	
NGC 7293	22 29 38.46	-20 50 13.3	13.51	V.Hot	
HR8634	22 41 27.64	+10 49 53.2	3.40	B8V	
LTT9239	22 52 40.88	-20 35 26.3	12.07	F	
LTT9491	23 19 34.98	-17 05 29.8	14.11	DC	
Feige110	23 19 58.39	-05 09 55.8	11.82	DOp	
GD248	23 26 06.69	+16 00 21.4	15.09	DC	

θ Vir

η UMa

α Lyr

ε Aqu

ζ Peg