

あなたもできるスペクトル測定

鈴木文二

(埼玉県立春日部女子高等学校)

1 ようこそスペクトルの世界へ

(1) スペクトルは四次元

私たちが、星ぼしの特徴を調べるために、一番簡単なことは写真を撮ることです。天体写真は、そのまま位置がわかる「二次元データ」です。高度・方位(図 1)から、撮影場所・時刻のデータを使って、天球座標(赤緯・赤経)に変換することができます。

また、基準となる天体の明るさがわかると、ほかの天体の明るさを(等級)を求めることができます(図 2)。カラー写真であれば、RGB の三色ごとの違いも求められます。明るさを測る作業のことを測光とよびます。このことで、天体写真が「三次元データ」になるのです。

さらに、天体からの光を、波長ごとにわけることができると(スペクトル)、温度、速度、磁場などの天体の物理量までわかるのです。分光器さえあれば、天体写真が「四次元データ」に変身します(図 3)。

マカリは、二次元から四次元まで、これらの測定を正確に、効率よく行うことができます。

(2) スペクトルの種類

スペクトルの種類には、「輝線スペクトル」、「吸収線スペクトル」および「連続スペクトル」があります。この二つ、あるいは三つが合わさって見えることがあります(図 4)。

原子、分子、イオンによって、どのような輝線、吸収線があらわれるかは決まっているので、天体の組成を知ることができます。連続スペクトルからは、温度の情報を知ることができます。さらに、ドップラー効果を用いて視線速度を測ったり、ゼーマン効果から磁場情報を得たり、現代天文学の最前線に迫れます。

(3) スペクトル撮影装置(分光器)

研究用の分光器のほとんどは、スリットとよばれる細い隙間に光を通して分光します。高価で大きな装置ですので、なかなか実

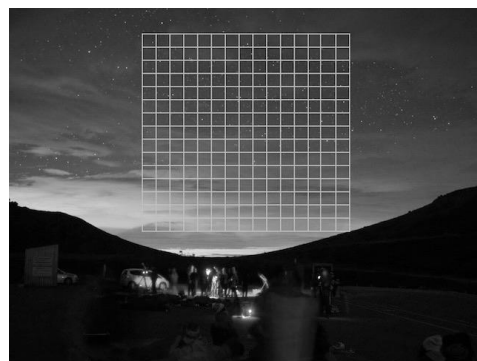


図 1 写真から座標を求める

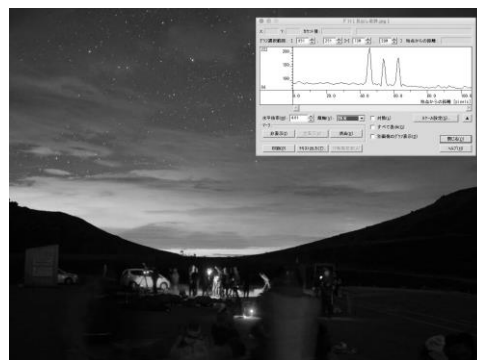


図 2 写真から明るさを求める



図 3 分光に挑戦する



図 4 スペクトルの種類

上：輝線スペクトル

下：連続+吸収線スペクトル

習に使えません。そこで今回は、対物式グレーティング(図5)を用いて、輝線スペクトルの波長を求める実習をします。用意するカメラに、標準レンズより少し短めの焦点距離のレンズがついているとよいでしょう。スマートフォンでも撮れます。

2 撮影しよう

(1) 分散方向に注意

グレーティングは、スペクトルのできる方向(分散方向)が決まっています。図6のように、長辺の方向に分散します。光源の位置に0次スペクトル、両側に1次、2次スペクトルができます。グレーティングとレンズ前面をなるべく密着させて、光源の0次、右側の1次スペクトルが入るように撮影します。測定作業を簡単に進めるためには、カメラ画面の水平、あるいは垂直方向に分散方向を一致させると良いでしょう。もし斜めになっていても、あとでマカリを使って画像回転ができるので、心配することはありません。対物式グレーティングでの撮影は、光源が小さな点、細い線であるほど、スペクトルがシャープに写ります。

(2) 絞り、シャッタースピードなど

図7の写真は、露出はカメラまかせで、調節は何もしていません。デジカメで撮る場合には、強い輝線スペクトルがつぶれないように、少しアンダー気味(マイナス補正)にすると良いでしょう。夜の街で明るい場合は、案外に自動露出で構わないことが多いです。

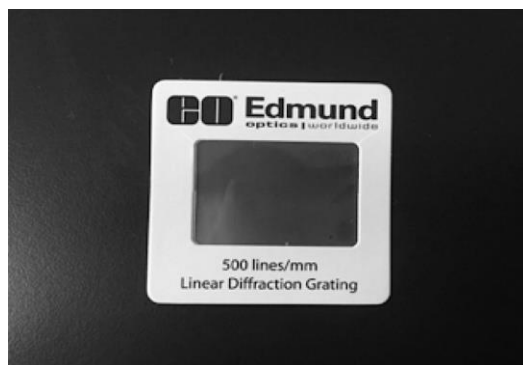


図5 対物式グレーティング
(エドモンド社製 500本/mm)

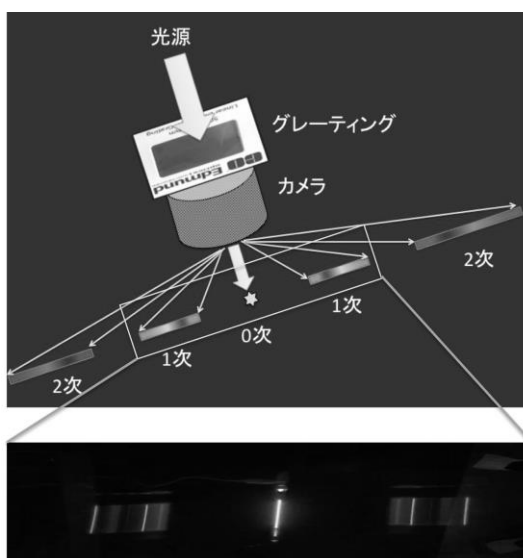


図6 グレーティングの分散イメージ



図7 スペクトル撮影例

左：春日部市の夜景 中：渋谷の夜景 右：月と金星

(3) RGB の特性に注意

デジタル写真では、色を再現するために、図8のように、RGBの三色の素子を使っています。スペクトルは色鮮やかに見えますが、それぞれのカメラの、RGBのどの波長域に写ったかによって、輝線スペクトルの強さなどが異なってきます。つまり、「見てくれ」が違ってきます。

デジカメで撮影できる波長域は、レンズとの組み合わせによります。カメラには、鮮明な画像を作り出すため、肉眼で見た色に近づけるため、紫外線・赤外線域をカットするようなフィルターが内蔵されています。

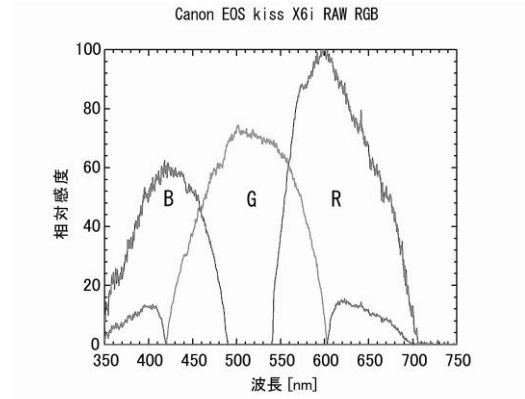


図8 デジタルカメラの分光感度例

3 波長を測ってみよう

輝線スペクトルの測定に挑戦してみましょう。スペクトル測定の最初は、波長を求めることです。これは、JPEG画像を使っても、じゅうぶん可能です。

(1) マカリで開く

マカリのファイル読み込みは、FITSが初期設定されています。ファイルを開くときに、「ファイルの種類(T)」のタブでJPEGを選びます。

(2) グラフを作る

グラフを描く前に、マカリの「画像演算(P) <ア>回転(R)...<イ>」機能を使って、スペクトルを水平(X軸に平行)にしておきます(図9)。

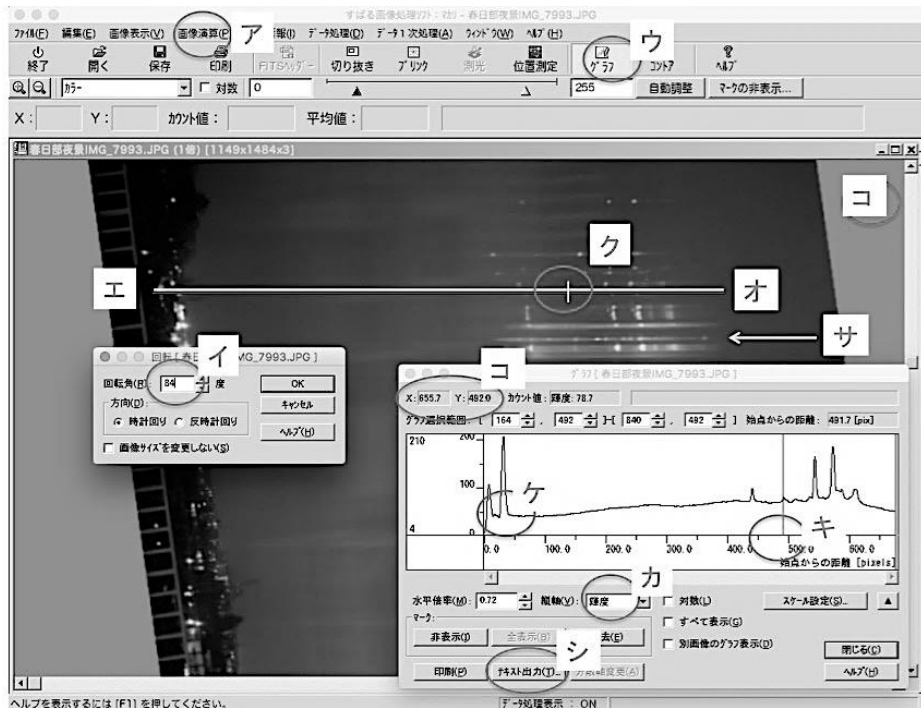


図9 スペクトルのグラフを作る

グラフアイコン<ウ>をクリックして、マウスを左クリック・ドラッグすると、スペクトルのグラフが描けます。0次スペクトルの外側<エ>を含み、1次スペクトルの赤の外側<オ>までドラッグしましょう。グラフダイアログの縦軸はタブをクリックして「輝度」<カ>を選択します。横軸はピクセル単位で表される「分散軸」です。グラフ内を左クリックすると紫の線<キ>が表示され、左上にはその x, y 座標が、クリック位置に相当する箇所が、スペクトル画像に短い縦線<ク>で表示されます。

(3) 輝線の位置を測定する

図 6 の 0 次スペクトルが、図 9 においても明瞭に出ています<ケ>。スペクトルは、街灯によく用いられている蛍光灯です。蛍光灯には水銀の輝線スペクトルが見えます。目立ったスペクトルの輝線のピークに合わせてダイアログ内をクリックして、その X 座標<コ>を求めていきます(図 10)。水平にグラフ作成線を引くと Y 座標は変化がありません。

Y (ピクセル)	備考	X (ピクセル)	原点変更X (ピクセル)	カタログ波長(nm)
496.0	0次	195.9	0.0	
496.0	1次-紫色	605.7	409.8	404.7
496.0	1次-水色	658.4	462.5	435.8
496.0	1次-緑色	707.1	511.2	546.1
496.0	1次-黄色	736.2	540.3	577.0
496.0	1次-橙色	751.5	555.6	589.0
496.0	1次-赤色	776.5	580.6	623.0

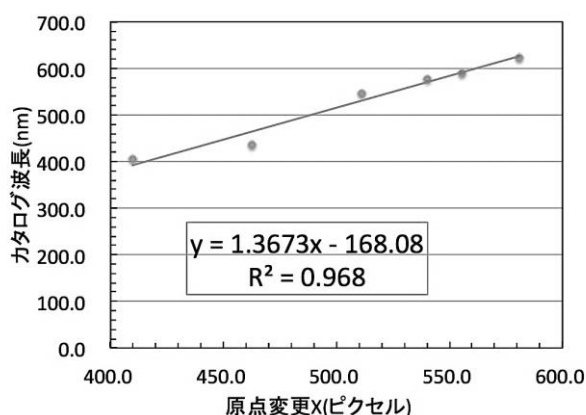


図 10 分散式を求める

(4) 分散式を求める

よく知られている顕著な輝線を頼りして、グレーティングとデジカメを合わせた、この「分光器」の分散関係式を作ってみます。撮影した時の光源の位置によって、0 次の位置はまちまちですから、エクセル上で 0 次の位置を 0 (原点) として、x 座標を変更します。こうすることによって、スペクトルがどの位置に写っていても、波長を求める分散式を使えるようになります。

エクセルで散布図を作り、近似式を一次関数で求めます(図 10)。オプションで「グラフに数式を表示する」、「グラフに R² を表示する」にチェックすると、スペクトルの分散式が表示されます。それぞれの輝線の推定した波長がうまく合っていると、相関係数 R² の値が 1 に近づきます。求めた一次関数の x は原点を変更したピクセル値、y が波長を示します。ここで、一次関数の

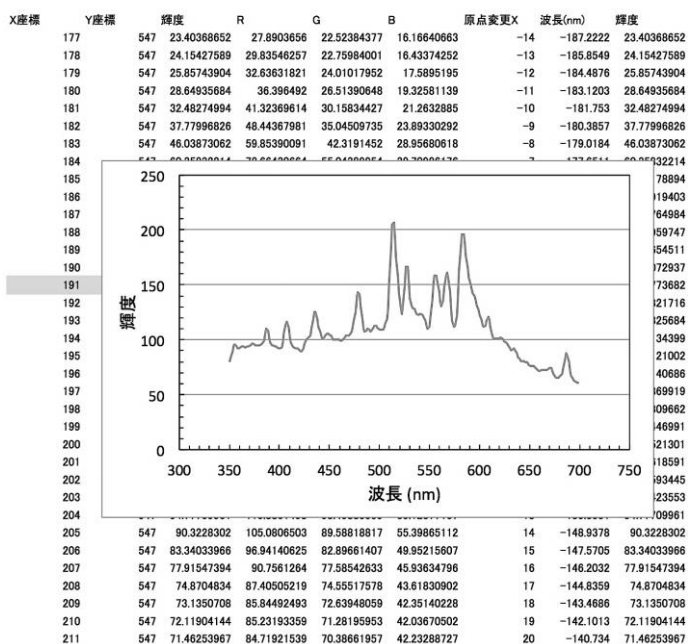


図 11 波長グラフを作る

傾きが分散を、 $x=0$ のときの値(y 切片)が計算上の 0 次スペクトルの位置になります。これらの値は、グレーティングとデジカメの組み合わせで変化する量です。厳密に言うと、同じ組み合わせでも、光源の位置によってわずかに異なりますから、0 次の位置(光源の位置)を一定にすることによって誤差を少なくできます。

(5) ブレンド

分光器の波長分解能が悪いと、隣り合った輝線を分解できずに、1 本のように見えます。図 12 は、ナトリウムの D 線 (589.0nm, 589.6 nm) が、ひとつに見えてしまう様子です。このような現象を「ブレンド」とよびます。分光器の性能の目安として、D 線が分解できるかどうかは分かれ目です。分散式を求める際に、ブレンドが予想される場合には、ふたつの波長の平均を用いるとか、工夫をしなければなりません。

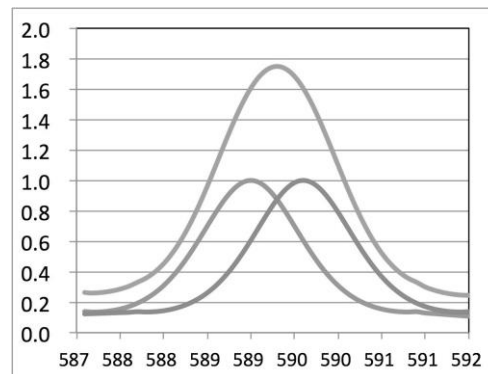


図 12 ナトリウム D 線のブレンド

(6) 分散式を活用する

図 9 の<サ>のスペクトルは、蛍光灯とは違った輝線が見られます。このスペクトルを調べてみましょう。未知のスペクトルの輝線の波長を求めて、構成成分を求めることを「スペクトルの同定」といいます。0 次スペクトルの位置を合わせることによって、エクセルで分散式を使えることになるのです。まず、(2)の手順と同じようにして、グラフを作成します。次に、テキスト出力(T)をクリックして、このグラフデータを、CSV 形式で出力しましょう<シ>。もとのファイルに“-2DGGraph”という文字が付け加えられたファイルが出来ます。この形式のファイルは、エクセルで読み込めます。データとして用いるのは、 x 座標と輝度です。ここで、図 7 の分散式をエクセルの関数として代入すると、 x 軸を波長で表すことができます(図 11)。1 次スペクトルの部分だけを取り出して、計算して構いません。輝線のカタログで、このスペクトルを探してみましょう。ネオンの輝線群に、ほぼ一致することがわかります。

4 もっと熱中しよう

(1) 分散軸パラメーター

「スペクトル解析は、なんと面倒なのか」と嘆きの声が聞こえそうです。JPEG 画像をエクセルで処理すると、本当に大変です。ところが、FITS 画像ならば・・・一挙に解決します。FITS は、ヘッダー部分にスペクトル解析の情報を埋め込むことができます。

(2) 一次処理を行う

スペクトルの強度を測定するためには、暗闇の中でダーク画像、「分光器」を平面光源に向けてフラット画像を撮影し、一次処理をする必要があります。

(3) 分光感度特性を求める

デジカメごとに感度特性が異なるので(図 8)、スペクトル強度の分かっているものを撮影して比較し、分光特性を調べておく必要があります。もっとも手軽なのは月のスペクトル撮影です。可視光線域では、太陽光の分光特性とほぼ同じです。