

短期連載：大阪教育大学金環日食プロジェクト

3 スペクトル教材：周縁減光と
スペクトルの変化

小倉和幸

小倉和幸・梅津寛明・小野里佳子・川端美穂・貴村 仁
 小林 弘・酒井大輔・塩田淳悟・白井みなみ・中岡雅樹
 野口 亮・藤井大地・古川寿美・増田剛大・松浦美波
 道端恵梨子・松本 桂・福江 純

〈大阪教育大学 〒582-8582 柏原市旭ヶ丘4-698-1〉

e-mail: fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

今回は小型分光器と CCD カメラを用いて取得した、金環日食中のスペクトル変化について紹介する。太陽を拡大して撮像するとわかるが、太陽面の明るさ（輝度）は一定ではない。太陽面中央部より周縁部のほうが少し暗くなっており、周縁減光効果と呼ばれている。このことは同時に、中央部より周縁部のほうが、観測される温度が低いことを意味している。したがって、太陽全体を撮影したときのスペクトルと比べ、金環日食時のスペクトルはやや赤いだろうことが予想される。実際に撮影してみた結果、たしかに金環日食時には青い光が減少し、スペクトルは赤くなっていることが示せた。スリットなどで工夫すれば、金環日食時以外でも可能だと思われる。スペクトルというハードルは低くはないが、高校向けなどで興味深いスペクトル天文教材になるだろう。

1. 太陽の周縁減光

本年2012年5月21日の金環日食で、市販のデジタルカメラに200 mm程度の望遠レンズと減光フィルタを付け、太陽像を撮影した人も少なくないだろう。市販のデジタルカメラなどでも、撮影した太陽像をよく見ると、表面の中央付近に比べて周縁部分が暗く見えるのがわかるはずだ。この現象は周縁減光と呼ばれるもので、太陽だけでなくその他の恒星でも周縁減光効果はみられる。

周縁減光が起こる原因は、太陽が内部ほど高温なガスの球体であるためだ。太陽を見るとき、われわれは太陽面の中央部でも周縁部でも、同じく、光学的深さが1程度からの光を見ている（こ

こで光学的深さが1というのは、ガス体が不透明になる深さで、空に浮かぶ雲の表面の見えている場所ぐらいに思えばよい)。そして、太陽が球体であるために、太陽面中央部はより深い場所からの、周縁部は観測者から測れば長い距離があるが表面からはより浅い場所からの光を見ることになる。もし、太陽内部の温度が深さによらず一樣ならば、太陽像は中央部でも周縁部でも同じ明るさに見えるだろう（あるいは固体微粒子が太陽光を散乱して光っている月面も、周縁減光は起こらない)。しかし、実際には、太陽は内部に向かって温度勾配があるため、表面中央付近に比べて周縁部では視線方向には同じ光学的深さでも表面から測った実距離での深さは浅く、より温度の低い部

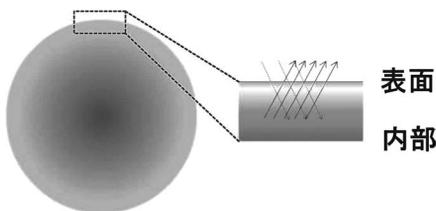


図1 平行平板大気.

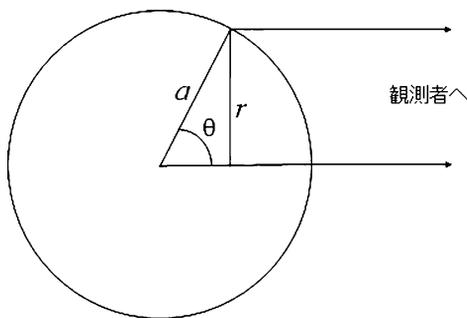


図2 太陽の周縁減光の説明図.

分からく光を見ていることになる。

黒体放射を仮定すると、明るさ（輝度）は温度の4乗に比例するので、温度が少し低いだけでも明るさへの影響は大きい（温度が4,000 Kの黒点と6,000 Kの光球では、温度の比は0.67ほどだが、明るさの比は0.20まで落ちる）。

この周縁減光効果は輻射輸送の理論で説明できる。すなわち、平行平板大気（図1）のミルン-エディントンモデルによれば、平板から鉛直真上方向への輝度 $I(0)$ と、真上から θ （方向余弦は $\mu = \cos \theta$ ）方向への輝度 I の比は、

$$\frac{I}{I(0)} = \frac{3}{5} \left(\frac{2}{3} + \mu \right) \quad (1)$$

で表される。真横（ $\mu = 0$ ）は4割まで落ちる。

太陽表面での平行平板層を考えると、平行平板大気で真上から測った角度 θ は、太陽表面の場所が変わった際には、観測者への方向から測った中心角 θ に等しい（図2）。したがって、太陽半径を a 、観測される太陽像の面中央からの距離を r とすると、 $\sin \theta = r/a$ なので、(1)式は、

$$\begin{aligned} \frac{I(r)}{I(0)} &= \frac{2}{5} + \frac{3}{5} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \\ &= 1 - \frac{3}{5} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

と変形することができる。

しかし、光学的深さは光の波長によっても異なり、したがって周縁減光の度合いも光の波長に依存する。そこで、しばしば使われるのが、

$$\frac{I(r)}{I(0)} = 1 - u \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \right) \quad (3)$$

という経験式である。ここで u は、太陽面中央の

輝度に対して周縁部での減光の割合を表すパラメーターで、周縁減光係数と呼ばれる：

$$u = \frac{I(r=0) - I(r=a)}{I(r=0)} \quad (4)$$

最初の(1)式の単純なミルン-エディントンモデルは、 $u = 0.6$ の場合に相当している。

波長依存性については、具体的には、短波長の光ほど周縁減光の影響を大きく受ける。例えば、波長6,000 Åでの経験的な周縁減光係数が $u = 0.56$ なのに対して、波長3,200 Åの場合は $u = 0.95$ となる。

2. デジタルカメラで周縁減光を調べる

太陽の周縁減光は、市販のデジタルカメラ画像でも簡単に確認できる（図3、図5）。よく晴れた日に、従来型の一眼レフデジタルカメラやミラーレス一眼レフに200 mm程度の望遠レンズと減光フィルタ（10万分の1程度）を装着し、適当な感度（たとえばISO100）と絞り（例えばF5.6）とシャッタースピード（例えば1/1000）で太陽像を撮影してみよう。黒点が出ていれば、まず黒点に気づくだろう。さらによく見ると、太陽面の中央部より周縁部のほうが暗いことが見て取れる。これが周縁減光である。

なお、ここで使用した機材は、一眼レフカメラ Pentax K-rと小型望遠鏡 Vixen A80M（口径80 mm、焦点距離910 mm）で、減光フィルタに

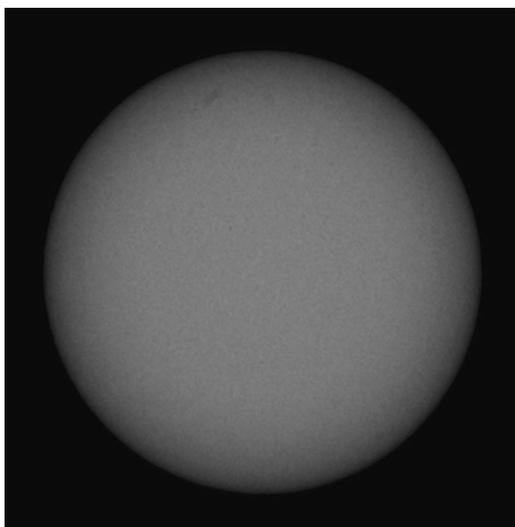


図3 デジタルカメラで撮影した太陽（シャッター速度=1/1,000秒）.

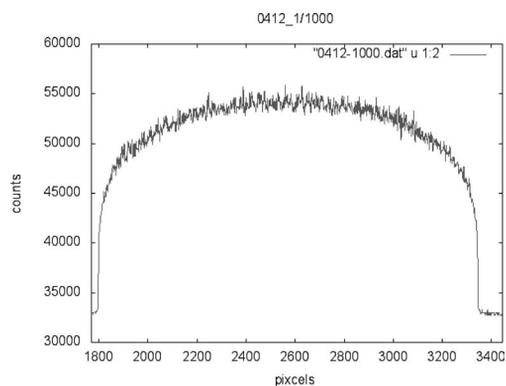


図4 図3の太陽像の中心を横切る直線に沿って描いた輝度分布.

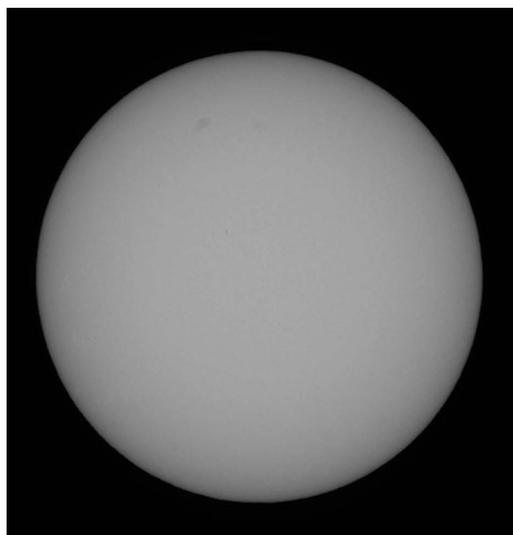


図5 デジタルカメラで撮影した太陽（シャッター速度=1/320秒）.

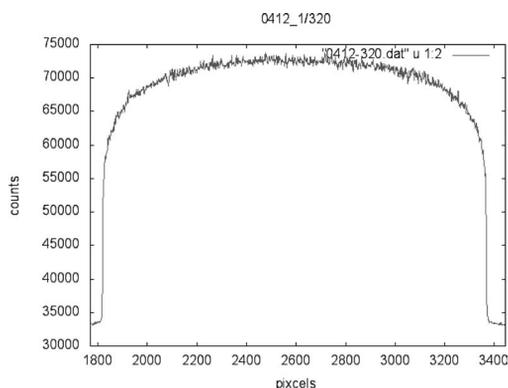


図6 図5の太陽像の中心を横切る直線に沿って描いた輝度分布.

はアストロソーラーフィルターを用いた。

さらに、マカリなどの画像処理ソフトで、太陽像の中心を通る直線に沿って輝度を測光すると、周縁減光の輝度の変化を図に示すことができる(図4)。図4を見ると、周縁減光の様子がはっきりとわかるだろう。

ところで、周縁減光を撮像するだけであれば、シャッター速度はむしろ遅めのほうがよい(図5)。シャッター速度を少し遅くすれば太陽面全体が明るくなって、周縁部の減光がよりはっきり

と見て取れる。ただし、シャッター速度を遅くすると、画面的にはいいのだが、輝度分布を描いてみると、中央付近から平坦に広がったグラフになってしまう(図6)。これは中央付近では露出オーバーとなりカウントが上がりすぎて、飽和状態になっていることを示している。

ちなみに、得られた輝度分布に、前述の経験式を一緒に描いてフィッティングしたものが図7である。図7の滑らかな曲線の上から順に、周縁減光係数が $u=0.2, 0.4, 0.6$ (エディントンモデル)

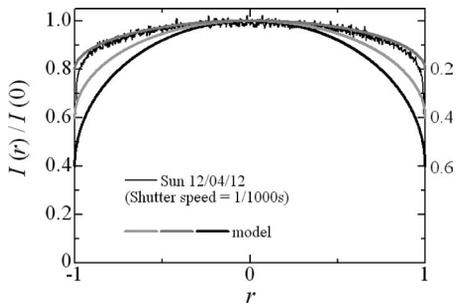


図7 経験式でフィッティングしたもの、滑らかな曲線の上から順に、周縁減光係数は、 $u=0.2, 0.4, 0.6$.

になっている。今回のデータでは、 $u=0.2$ ぐらいでフィッティングできていることがわかる。

ただし、市販のデジタルカメラでの測光には、定量的な面では問題点もある。カメラがどの波長域の光を受光しているのか、また受光素子のリニアリティ（直線応答性）はどの程度よいのかなど、専門的な撮像素子と比べると、十分に評価できていない部分があるためだ。しかし、高校生や大学生向けの天文教材として、ごく手軽に周縁減光を示すものとしては十分な内容の素材が得られるだろう。

3. 日食時の太陽スペクトルの変化

ここまで紹介したように、太陽は周縁減光により周縁部では中央付近に比べて温度が低いところからやってきた光を見ている。そしてそれは、中央付近は相対的に青く、周縁部は相対的に赤く見えることを意味している。そのため、金環日食によって太陽の中央付近が隠され、周縁部からやってくる光のみを見るとき、太陽全体が見えているときよりも赤く見えるはずだ。実際にそのような結果が得られるかどうか、われわれはスペクトルの観測を行った。

3.1 スペクトルの観測

スペクトルの観測に用いた分光器は、Shelyak社のLHIRES III、CCDカメラはSBIG社のST-10XMEを使用した（図8、図9）。回折格子は150



図8 赤道儀に観測機材をマウントしたところ。



図9 当日の観測の様子（大阪教育大学柏原キャンパス天体観測室屋上；北緯 $34^{\circ}32'52.7159''$ ，東経 $135^{\circ}39'6.6462''$ ，高度155.75 m）。

本/mmのものを使用したので、観測波長域が $3,900\text{--}8,600\text{ \AA}$ で、分解能は $6,000\text{ \AA}$ で $R=300$ である。

図8のように赤道儀に乗せ、天体を追尾ができる装置がないため、まず青空のスペクトルを撮影した。5月21日当日の観測は、太陽がかけ始める前の6時15分（観測地では6時15分55秒が食の始め）から開始し、食が終了した後の9時10分（同8時54分16秒に食の終わり）まで、30秒の間隔で、1枚当たり0.12秒の露出で行った（図9）。食中はおおむね晴れていたが、食が始まる前から6時25分ごろまでは曇っており、食の終わりごろも太陽は雲に覆われて、姿は見えなくなっていた。

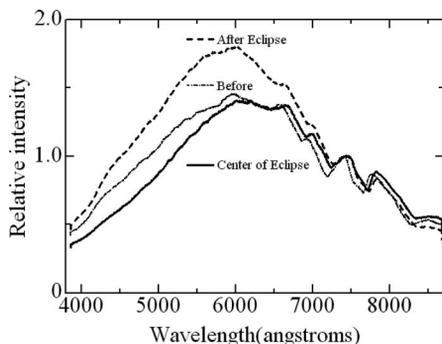


図10 食の開始前（一点鎖線）、最大付近（実線）、終了後（破線）の太陽スペクトル。

3.2 観測結果とスペクトルの変化

図10に示したのは、食の開始前（6時15分、太陽高度 15° ）、食の最大付近（7時29分、高度 31° ）、そして食の終了後（9時00分、高度 50° ）のスペクトルを並べたものである（開始前は5枚、食中は7枚、終了後は10枚を撮影して平均した）。縦軸は相対値なので、どこで合わせるかは判断が必要である。しかし、 $7,000 \text{ \AA}$ より赤い側はほぼ同じスペクトルなのに対し、 $7,000 \text{ \AA}$ より青い側のスペクトルは明らかに形が違っているのが見て取れた。そこで、図10では、右方の赤い波長域で合わせるようにした。

この図だけではわかりにくいので、食の最大付近のスペクトルを、食開始前および食終了後のスペクトルで割ったものを、図11と図12にそれぞれ示す。

図10を見ると、食の終了後（一番上の破線）に比べて、食の最大付近（金環時；一番下の実線）のスペクトルは、青い光が大きく減少していることがわかる。また食の開始前のスペクトルも終了後より青い光が減っているが、これは開始前の太陽高度が低いことによる大気吸収の影響だと考えられる（次回の記事）。しかし、その食の開始前のスペクトルと比べても、食の最大付近のスペクトルでは青い光が少ない。

実際、図11や図12を見ても、波長に対して左下がり青い領域で1よりかなり小さくなった

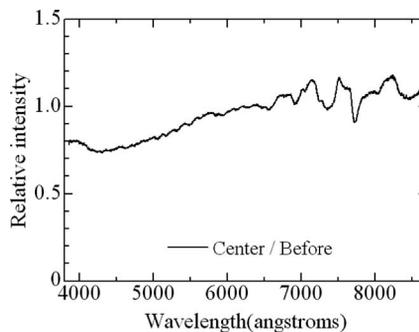


図11 食の最大付近のスペクトルを開始前のスペクトルで割った結果。

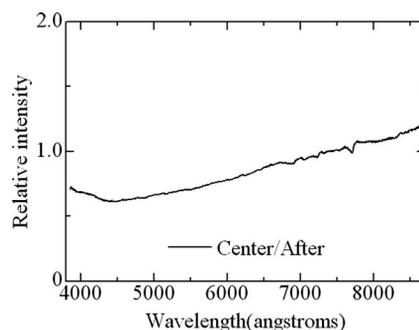


図12 食の最大付近のスペクトルを終了後のスペクトルで割った結果。

（図11で右側がギザギザしているのは波長校正の精度が悪くて生じたずれによるもの）。このことは、予想どおり、食の開始前、終了後に比べて、食の最大付近の太陽が相対的に赤くなっていることを意味している。しかし、大気吸収の影響もあるので、これらすべてが周縁減光によるものだと断定することはできない。

大気吸収の影響については、以下のように評価できる。大気吸収は、太陽の高度が低いほどその影響が大きくなる。したがって、食の最大付近（ 31° ）と食の開始前（ 15° ）との比較（図11）では、食の最大付近よりも開始前のほうが太陽高度が低く大気減光の影響も大きいはずだ。その場合でさえ、図11でわかるように、今回の観測結果は食の開始前よりも食の最大付近のほうが青い光が明らかに減少しており、相対的に赤くなってい

るという結果だった。このような結果となった原因は、周縁減光にほかならないだろう（大気吸収で減じられている）。

一方で、食の最大付近（31°）と食終了後（50°）との比較（図12）では、より高度の低い食の最大付近のほうが大気吸収の影響を受けている可能性がある。そこで他日、30°と50°でのスペクトルを撮影してみたが、ほとんど有意な差は得られなかった。大気の透明度などは日によっても時間によっても変化するが、図12の場合でも、周縁減光による赤化が主な原因と推定しても、あながち間違いではないと思われる。

4. ま と め

本稿で紹介したわれわれのスペクトル観測結果は、分光器の波長校正の精度が十分ではなかったなど、そのほかいくつかの問題点があるため、定量的な科学研究に使うことは難しい。しかし、定性的には正しい結果が得られており、これらの結果をスペクトル天文教材として利用することで、天文イベントとして盛り上がった金環日食をきっかけとして、さまざまなことを学ぶことができるだろう。スペクトルやその変化についてはやや高度な内容であるため、対象としては高校生以上が想定されるが、周縁減光の影響で太陽光の色

が変わって見えるということは非常に面白い内容だと思われる。今後も、このまたとない機会に得られたデータをもとにしたさまざまな教材について考えていきたい。

最後に、スペクトル観測では、長野高専の大西浩次さんにいろいろなアドバイスをいただいたので、この場を借りて深く御礼申し上げる。

Limb-Darkening and Spectral Variation during Annular Eclipse 2012; The Case of Osaka Kyoiku University

Kazuyuki OGURA, et al.

*Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University,
4-698-1 Asahigaoka, Kashiwara, Osaka 582-8582, Japan*

Abstract: We have observed spectra during the annular eclipse on May 21. Since the sun is a gaseous sphere with a temperature gradient toward the deep interior, there exists a limb-darkening, where the solar limb is darker and more reddish than the solar center. Due to this limb-darkening, the spectrum would become red at the maximum of the annular eclipse, compared with that out of the eclipse. We confirmed that the spectrum is red during the annular eclipse.