

短期連載：大阪教育大学金環日食プロジェクト

4. ライトカーブ教材：光度変化と周縁減光

川端美穂・梅津寛明・小倉和幸・小野里佳子・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



川端美穂

〈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

短期連載の最終回として、市販デジタルカメラのデータを用いて、金環日食中の光度曲線を描いてみたので、その結果を報告する。また併せて、周縁減光の影響による光度曲線の違いについても考察した。日食が起これば、太陽の明るさは大きく変化する。肉眼ではまぶしくてわからないにせよ、撮影データを解析すれば、明るさの変化（光度曲線）を調べることは可能だ。さらに金環日食の場合は、太陽周縁部の暗い領域が残るので、周縁減光の影響が光度曲線にも見て取れるかもしれない。実際の観測では、大気吸収の影響や雲の影響などもあったが、光度曲線はおおむね理論曲線と一致した。ただし、周縁減光の効果までは十分に判別できなかった。なお、通常の部分日食でも光度変化は十分に起こるので、観測データとモデル光度曲線を比べることで、高校現場などでは教育的な実習が可能になるだろう。

1. 太陽の周縁減光と光度曲線

前回に述べたように、太陽が高温のガス球で内部に向かって温度勾配があるため、いわゆる周縁減光が生じる。すなわち、太陽像の中央部に比べ、周縁部のほうが暗く赤く観測される。前回の周縁減光の経験式で出てきた周縁減光係数が、中央部と周縁部の明るさ（輝度）の比になっていた。そして太陽像の輝度分布からは、周縁減光係数が $u=0.2$ ぐらいでフィッティングできたので、今回の市販デジタルカメラの撮像データでは、周縁部が相対的に2割ぐらい暗いことを意味した。

これだけの違いがあれば、原理的には金環日食時の光度曲線も影響を受けるだろうと期待できる。実際、1958年の金環日食などでは、専門の

装置を使って、学術的な研究も行われた¹⁾。現在では民生用でも性能がいいので、市販デジカメによる撮像データで光度曲線を作成してみた。

まず光度曲線がどれぐらい変化しそうか、事前に簡単な解析を行った。太陽半径を1とする単位で、月の半径を m （今回は0.94を採用）、太陽中心と月中心の距離を d とする。幾何学的な問題なので解析的に出せないかと試みたが、結局、力づくで数値的に計算したのが、図1と図2である。

それぞれの図の横軸は中心間の距離 d で、 $1+m=1.94$ が第一接触、 0 が完全な金環日食時に相当する。また縦軸は明るさの変化で、破線がいろいろな周縁減光係数に対する生の光度曲線で（スケールは任意）、実線が周縁減光係数が 0 （太陽面の輝度が一定）のケースで割った相対的な光度

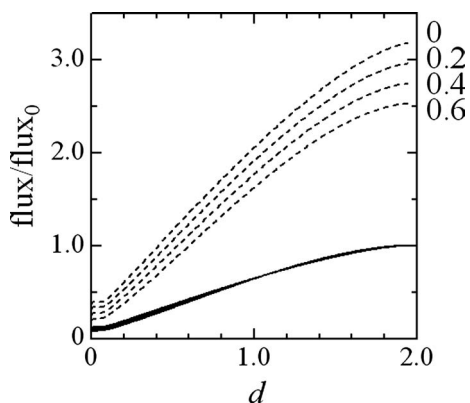


図1 モデル光度曲線。横軸は中心間の距離、縦軸は明るさの変化。破線の周縁減光係数は、上から0, 0.2, 0.4, 0.6。実線は周縁減光係数が0の曲線で割った相対光度曲線。

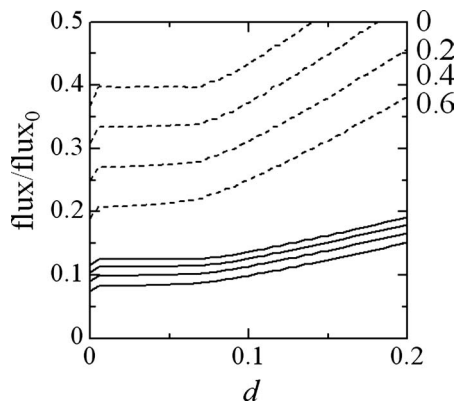


図2 モデル光度曲線の拡大図。横軸は中心間の距離、縦軸は明るさの変化。破線の周縁減光係数は、上から0, 0.2, 0.4, 0.6。実線は周縁減光係数が0の曲線で割った相対光度曲線。

曲線である。また図2は図1の拡大図である。

まず全体の光度曲線(図1の破線)を見ると、周縁減光が大きいほうが(ない場合と比べ)少し暗くなるので、光度曲線が相対的に下がっていることがわかる。ただし、これは相対的な問題であり、実際にそれぞれの曲線が得られるわけではないので単純には比較できない。しかし周縁減光がなく(係数が0)太陽面の輝度が一定の場合は幾何学的に計算できるので、その場合と比較することは可能で、それが実線である。

図1の実線を見るとほとんど重なっているが、金環時付近を拡大した図2では少し差があることがわかる。第二接触($d=1-m=0.06$)以降では光度曲線はほぼフラットだが($u=0$ は完全にフラット)、周縁減光係数が大きいほど、期待どおりに、相対的にはやや暗い。実際、周縁減光係数より少し小さめ程度の差異はあるので、今回使用したデジタルカメラ(Nikon D5100)では、1割程度の違いが期待できることがわかった。

2. 大気減光の補正

太陽に限らないが、天体の明るさの変化を調べる際には、地球大気による大気減光の補正をしなければならない。

地上で観測する場合、天体の光がわれわれに届くまでに地球の大気を通過することになる。光が大気中を通過する際には、大気中の粒子により光が吸収・散乱され、大気外での明るさよりも暗くなって観測される。これが大気減光である。

今回の日食は早朝に始まり、太陽の高度が低く、光が通過する大気が厚くなるため、特に金環日食前半では大気減光の影響を大きく受ける。

大気減光の式は、輻射輸送の理論から得られている。地球の大気を平行平板大気とし、天体の本来の輝度を I_0 、天頂方向の光学的厚みを τ_0 とする。このとき天頂距離(天頂から天体までの角度)が θ (方向余弦が $\mu = \cos \theta$)である天体の見かけの輝度 $I(\mu)$ は、

$$I(\mu) = I_0 e^{-\tau_0/\mu} \quad (1)$$

と表せる。観測波長や気象条件などにも依存するが、おおざっぱには、この式を用いることで大気減光を見積もることができる。たとえば、図3に示すのは、さまざまな τ_0 の値に対して、大気減光の割合を求めたものである。

実際に5月21日の観測結果を(1)式でフィッティングしたものを図4に示す。図4では、(1)式の両辺の対数を取って表しているため、 $1/\mu$ に

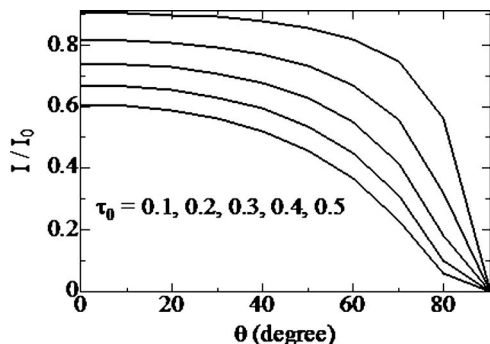


図3 さまざまな τ_0 に対して、天頂距離の関数として表した大気減光. 天頂方向の τ_0 の値は、上から、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

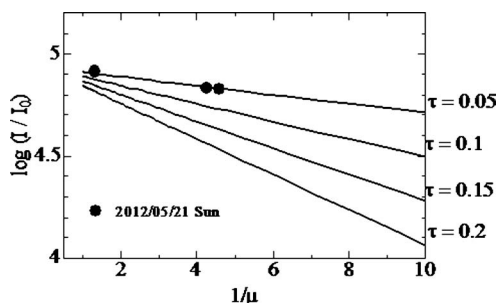


図4 大気減光のフィッティング (奈良県香芝市の観測データ). ●は右から、食開始前 (6:00; 高度12.6°), 食開始前 (6:05; 高度13.6°), 食終了後 (9:05; 高度51°) で、実線はいろいろな τ_0 に対する理論直線.

関する線形の関数となっている。

金環日食当日は、食中はきれいに晴れたものの、雲が多い天気であったため天頂付近に到達した太陽が観測できなかった。そこでわれわれは食の前後で太陽全体が見えているときの観測結果から天頂での光学的厚み τ_0 を推定した。図4で見るように、当日の τ_0 は0.05程度ぐらいだった。

3. 日食時の光度曲線

では、金環日食当日の観測と、実際の光度曲線はどうなったかを紹介していこう。

3.1 観測機材

太陽の撮像に用いた機材を図5に示す。一眼レ



図5 今回のデータの観測機材 (奈良県香芝市新池公園; 北緯34.5294°, 東経135.7128°). カメラはニコンD5100, 三脚は小型軽量のSLIKコンパクトで、どちらも市販品である.

フデジタルカメラはエントリー機種であるニコンD5100で、ダブルズームキット (実売が7万程度) にすれば、通常のレンズに加え200 mm 望遠レンズが附属する。三脚は小型軽量のSLIKコンパクトで6,000円ほどである。これらはふだんでも使えるもので、唯一、日食用の機材が減光フィルター (この例では、ケンコー58S ND400×2枚) で、2枚重ねて16万分の1に減光した (6,000円×2)。1回限りならバーダー社製の太陽フィルターがより手軽で安価である。これらの機材は2011年度の予算で購入し、事前に半年ほど練習を繰り返し、感度・絞り・シャッタースピードなどは適切な値を探しておいた。

3.2 金環日食中の光度曲線

市販のデジタルカメラは、デフォルトではjpg形式などで画像データを保存する。しかしjpg形式ではデータ圧縮を行うためデータが劣化する可能性があるため、モードを変えて、非圧縮のRAWデータで保存する必要がある。またRAWデータは機種依存性などがあって画像処理ソフトで扱えないことが多いので、カメラ付属のソフトで、FITSデータへ変換した。最後に、マカリを

用いて、各観測時刻における光度を求めた。

図6は大気減光を補正する前の、生データの光度曲線である。5分刻みの観測データを時系列で並べたもので、マカリの仕様上、R(破線) G(実線) B(一点鎖線)に分解されている。観測開始時に少し曇っていて、6:25(目盛り8)ぐらいからデータが得られており、7:05(目盛り16)に雲が懸かったが、食が最大となる7:30(目盛り21)前後からは綺麗な光度曲線になっている。食の前半と後半で光度曲線がやや非対称なのは大気差の影響だと推測される。

大気減光を補正したものが図7である。それぞれの時刻での高度(あるいは天頂距離)から(1)式に従って大気減光を計算した。その際に、図4のフィッティングから $\tau_0=0.05$ とした。図7で細い線は補正前の光度曲線で、太い実線(G)、太い破線(R)、太い一点鎖線(B)が補正後の光度曲線である。

図7を見ると、太い実線(G)については、食の前後でおおむね対称になっていることがわかる。一方、太い一点鎖線(B)は相変わらず食の前の方が食の後より暗い。今回用いたカメラの色感度曲線などは確認していないので、それらの校正が不十分なためもあるだろうが、主な原因は、大気減光の波長依存性だと考えられる。すなわち、大気減光の(1)式は波長依存性は表に出していない

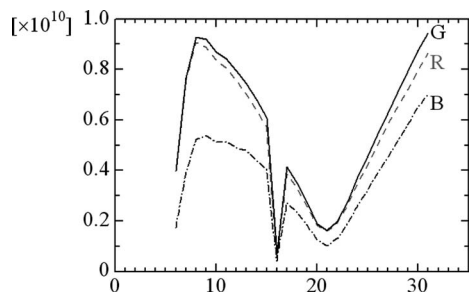


図6 大気減光補正前の生データの光度曲線。横軸は5分刻みの目盛りで、最初少し曇っており、目盛り8(6:25)、目盛り10(6:35)、目盛り16(7:05)で雲に隠れ、目盛り21(7:30)が食中、目盛り31(8:20)まで。

いが、本来は光学的厚みには波長依存性があり、よく知られているように青い光の大気吸収は強い。これらの点は念頭に置きつつ、光度曲線のデータを検討する必要がある。

3.3 モデル光度曲線との比較

本来の光度曲線は時間の関数として描くのがふつうだろうが、モデル光度曲線(図1, 図2)は中心間の距離の関数として求めてある。そこで、観測時刻における中心間の距離を調べて、モデル光度曲線のほうに合わせて描いたのが図8である。

図8では、図1のモデル光度曲線に合わせて、上下は適当に規格化しながらプロットしたが(○が食までの前半で、●が後半)、傾向はともかく、十分にフィッティングしているとは言い難い。これでは、周縁減光効果の違いを見るどころではない(笑)。

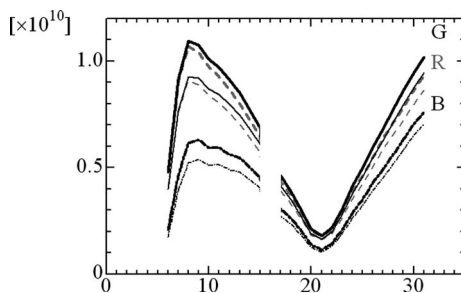


図7 大気減光補正後の光度曲線。太線が補正後で細線は補正前。

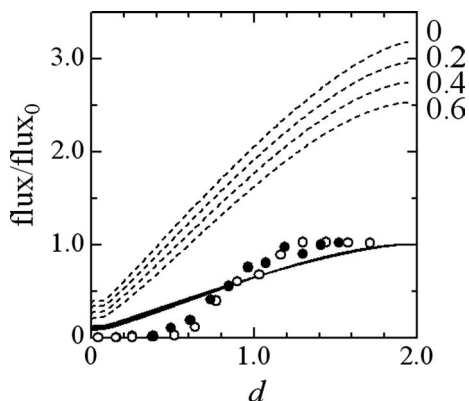


図8 図1のモデル光度曲線上にプロットした観測値(G)。○が食までの前半、●が後半。値は適当に縮尺してある。

幾何学的な掩蔽による光度曲線の変化が主なので、モデル光度曲線と観測値は、本来は、おおむねフィットするはずのものである。合わなかった原因としては、

- (1) モデル光度曲線の計算間違い
- (2) 観測データの処理間違い
- (3) 各時刻での中心間距離の導出間違い
- (4) 露出オーバーなど機材が原因

など、いろいろ考えられる。このうち、(1) から (3) は人為的ミスで、かなり原因調査をしたが、結局不明なまま、図8を掲載することにした。

もし本稿を読んで、原因に思い当たる方があれば、是非、ご一報いただきたい。

4. 天文学習教材としての太陽

金環日食中のスペクトルでは周縁減光効果の影響が十分に見て取れたが(第3回)、今回の光度曲線では、周縁減光効果のはっきりした影響までは十分に判別できなかった。そもそも、観測値とモデル値の十分なフィッティングもできなかったが、かりに十分にフィットできたとしても、周縁減光効果までは検出が難しかったと推測される。

使った機材が違うということもあるが、大きな理由は、分光観測と測光観測の違いだろう。分光観測では波長別の情報量が得られるのに対し、測光観測では波長積分をするので、どうしても情報量が圧縮されてしまう。市販の機材ではこちらへんが限界かもしれない。

その一方で、スペクトルを取得するのは少しハードルが高いのに比べ、光度曲線は比較的容易に描ける。したがって、部分日食などの際に、市販の機材で撮影した太陽像をもとに、光度曲線を描くのは、非常にわかりやすくて面白い実習になると思われる。

最後に一言(文責JF)。従来、学生の実験や、ここ数年で激増した教員向けの研修などで、天文学習教材として太陽を使う際には、ごくふつうに、小型望遠鏡での太陽投影をしてきた。小型望

遠鏡と太陽投影板という組み合わせは、太陽観測のごく標準的な方法で、いわばセントラルドグマみたいなものだ。しかし、ここで、コペルニクスの転回をすべきかもしれない。今回のような市販デジタルカメラを使う方法は、太陽観察にとって実は非常に有効な手段ではなからうか。

まず、小型望遠鏡に比べ、一眼レフデジタルカメラが安価になったことが挙げられる。10年ぐらい前だと、カメラ本体だけでも20万ぐらいはしたことを思うと、いまはほんとに個人でも手が届く値段になった。

また、現場の先生にとって、小型望遠鏡という物体は非常に取っつきにくく、扱うのに躊躇する代物である。顕微鏡などと異なって、めったに使うこともないだろうし、それなりに高価なものだから、取り扱いを誤って壊すのもコワイ。それに対して、カメラは違う。コンパクトデジカメならすでにお馴染みだろうし、一眼レフカメラへの抵抗感もほとんどないだろう。望遠鏡という得体のしれない物体に比べて、カメラはコワくないモノなのだ。

そして、重要な点として、カメラは思いのほか安全性も高い。小型望遠鏡の場合、間違って接眼レンズをのぞくと失明の危険がある。しかしカメラだと太陽像をモニターを通して見るので、仮に減光フィルタを装着し忘れて太陽に向けても、せいぜいカメラがお釈迦になるくらいで済むだろう。もちろん、太陽に向けたりする際に注意は必要だが、レンズ系を通した光を直接に利用するのか、CCDを通した間接的な光かは、安全性にとって大違いだろう。この点は、従来は見落とされていたように思う。

実際、夏休みに実施した教師向けの理科実験セミナーで、小型望遠鏡が使えない場所だったので、オプション的に太陽のカメラ撮像を紹介したら、予想外に非常に好評だった(図9)。カメラは3台ほど用意したが、そのうちの1台と同型のカメラをもっている(女性の)参加者さえいた。



図9 教師向けセミナーの風景 (2012年8月22日, 大阪教育大学附属天王寺学舎で). 40人近くの現職教員が, 市販デジタルカメラの使い方などを興味津々と見守った。

エントリー機種の一眼レフカメラは, それぐらい普及しているわけで, 上記のような認識を新たにされた次第である。

ただし, 写真のプロにとっては常識以前のことで, 初心者はわからないことが多い。特に現在ではデジカメが普及し, ほとんどがオートになっているので, まずマニュアルモードというものを知らない人が多い。そしてネットなどで調べてみても, 初心者には複雑怪奇な情報の山盛りで, 設定の仕方が難しすぎるようだ。

だから上記のセミナーでも, デフォルトのオートでは太陽をちゃんと写せないこと, マニュアルモードというものにセットすること, など, ごく初歩的なことから説明した。さらにマニュアルモードでいろいろ設定する数値のうち,

- ・感度 ISO 100 (200とかでも構わない)
- ・絞り F5.6 (違う値でも構わない)
- ・シャッタースピード 1/1,000

ぐらいを決めればまずは十分で, ほかの設定はとりあえず無視してください。そして, シャッタースピードをいろいろ変えて写してみてください, という最小限のセット方法だけ伝えた。まあ, とにかくそれで最低限の太陽像は写るので, 慣れれば, いろいろ工夫していけばよいだろう。みなさ

んもチャレンジしてみていただきたい。

2012年5月21日に起こった金環日食に向けたプロジェクトの成果を4回にわたって紹介してきたが, 金環日食や皆既日食はともかく, 部分日食はしばしば起こるし, 晴れた日には太陽はいつもそこにある。安全な観察法を念頭に置きつつ, 天文学習教材として, 教育現場でも太陽をもっともっと活用して欲しいものだ。

金環日食へ向けて, 大阪教育大学では, 2011年11月26日, 2012年2月18日, 2012年4月28日と3回にわたり, 金環日食講習会を実施した。講師をしていただいた大西浩次さん (長野工業高等専門学校), 井上 毅さん (明石市立天文科学館), 大越 治さん (日食観測学習連絡会), 時政典孝さん (元 西はりま天文台) には, この場を借りて深く感謝したい。また多すぎて名前は挙げないが, ほかの多くの方々にも, さまざまな機会を通じ, いろいろ教えを受けた点, ここで謝意を表しておきたい。

参考文献

- 1) Saito K., Hata S., 1960, PASJ 12, 143

Limb-Darkening and Light Curve Analysis during Annular Eclipse 2012; The Case of Osaka Kyoiku University

Miho KAWABATA, et al.

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

Abstract: We have obtained light curves during the annular eclipse on May 21, using the observed data by digital cameras. Correcting the atmospheric extinction, we obtained the RGB light curves. On the other hand, we also calculated model light curves, considering the limb darkening. We have fit the observational data to the model curve, but it is difficult to distinguish the limb-darkening effect.