



ケアンズ皆既日食と白色光コロナの解析



福江 純・小倉 和幸・川端 美穂
野口 亮・松浦 美波・松本 桂

〈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

太陽の年2012年のラストを飾るのは、〈大阪教育大学2012年金環日食・皆既日食プロジェクト〉の締めくくりでもある、オーストラリアはケアンズでの皆既日食だ。5月の金環日食，6月の金星太陽面通過などを経験に，いよいよ本番に臨んだ。残念ながら生憎の悪天候で，事前計画どおりにはデータの取得はできなかったが，幸いに皆既時だけは奇跡的に晴れ間から太陽が顔を出し，最重要目標だったコロナの撮影はできた。本稿では，全体の概要と白色光コロナの簡単な解析を紹介する。また観測ツールとして，デジタル一眼レフカメラの利便性についても議論したい。

1 クライマックス到来！

長いようで短い3年間（足掛け4年以上）だった。詳しくは金環日食の短期連載などで書いたように，日本近海で2009年7月22日に起こった皆既日食のときから計画していたのが，北部オーストラリアなどで2012年11月14日に起こる皆既日食の観測である¹⁾⁻⁵⁾。日食は天候という運に左右されるリスクなお相手だが，オーストラリアなら南天の星々も観測できるので，一石二鳥のチャンスであり，長期計画で臨んだ。

またできれば，それなりに観測ができるような体制を組んで，オフィシャルな観測ツアーにしたい。幸い，2012年の5月21日には日本で金環日食もあるので，それも合わせて〈大阪教育大学2012年金環日食・皆既日食プロジェクト〉と題し，観測隊の組織・機材の入手・渡航旅費の確保・事前の練習などなど，3年かけて周到な準備を行った。そしてついに本番の日を迎えた。

最終的には，スタッフ2名（福江，松本），院生2名（小倉，野口），学部生2名（川端，



図1 観測隊の主力部隊（川端・野口・松浦・小倉）。

松浦），計6名という観測隊で，ケアンズ近傍のアマルーで皆既日食に挑むこととなった（図1）。

本稿では，全体の概要と主な成果について紹介したい。以下，2節で事前の計画と簡単な結果をまとめ，3節で白色光コロナの観測と解析を述べる。4節で教材利用などのコメントをする。

2. 事前プランと結果

金環日食時の経験²⁾⁻⁵⁾をベースに，事前の計



図2 観測地アマルーの様子。左ウィング（北側）は日本人ばかりだったが、全体で1,000人ほどが集まっていた。正面右手（東）に太陽は昇っているはずが見えないので、明後日の方向の晴れ間を撮影している。

画・分担としては、

（皆既日食前後の時間帯に対しては）

- ・ 5分おきの静止画撮影
- ・ 動画撮影（太陽と空や雲の変化）
- ・ 魚眼レンズによる全天撮影
- ・ 太陽中心の広角撮影

（皆既日食中は）

- ・ 白色光コロナの撮影
- ・ プロミネンスの撮影
- ・ 可能ならスペクトル撮影
- ・ 魚眼レンズによる全天撮影（空の色の変化）
- ・ 太陽中心の広角撮影（空の色の変化）
- ・ 同一視野に星を写したコロナの表面測光

（プラスアルファとして）

・ 南天の星座、天の川、大小マゼラン雲の撮影など非常に多くのプランを立てていた。

残念なことに、皆既日食当日は曇天ときどき小雨模様という悪天候で（図2）、そこそこのデータが得られたのは下線を引いたもののみだった。

このうち動画撮影については、もともとは金環日食のときの³⁾ように、太陽と月の日周運動などの教材にする予定だった。結果的に、観測地アマルーに集まった人々の絶望感（皆既前）と歓喜（皆既時）の人間記録および雲の流れを記録したものになった（<http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/>）。

ところどころに雲の切れ間はあったのだが、皆既の直前に太陽の方向に雲の切れ目が移動し、淡く乳白色に輝くコロナをまとった太陽が姿を現し



図3 アマルーの黒い太陽。カラーだとプロミネンスもわかる（Fuji Lumix gf3+300 mm望遠レンズ使用；ISO100, F/5.6, 1/250秒）。



図4 ダイヤモンドリングになったはずの瞬間。コンデジでもわかるぐらい空はまだ暗い。

た（図3）。白色光コロナについては、次節で述べる。残念ながら、第三接触の直前に、太陽はふたたび雲に隠れ、ダイヤモンドリングは見られな

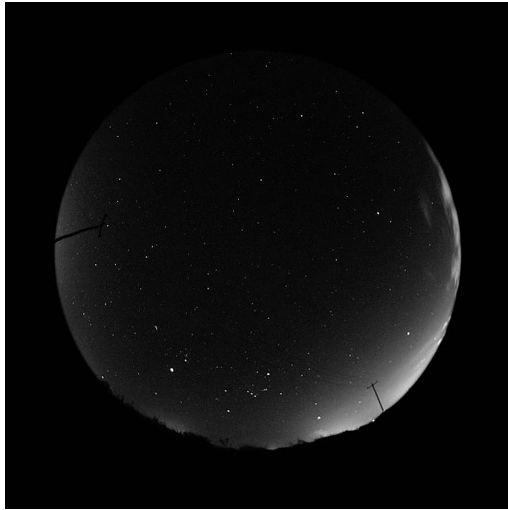


図5 魚眼レンズで撮影した南天の星空. 左下の明るいのは木星, 下方のオリオンと右下のシリウス, 右方のカノープスの位置関係に違和感がある.

かった (図4)

さらに今回は割愛するが, 南天の星空も撮影したので, さまざまな教材に利用したい (図5).

なお, おおまかなタイムテーブルとしては, 観測地点アマルーの,

- ・南緯 16度 49分
- ・東経 145度 35分

においては,

- ・第一接触 (部分食の開始): 05:45 ごろ
- ・第二接触 (皆既食の開始): 06:38 ごろ
- ・第三接触 (皆既食の終了): 06:40 ごろ
- ・第四接触 (部分食の終了): 07:40 ごろ

の予定であった. 皆既の時間は, 2009年の6分強よりはだいぶ短くて,

- ・2分00秒

程度だったはずである.

3. 太陽コロナの観測と解析

今回, 曇天の中, 奇跡的に皆既食と白色光コロナは撮影できた. ただし, 肉眼では晴れ間のように見えたが, 露出をかけた写真などをみると若干

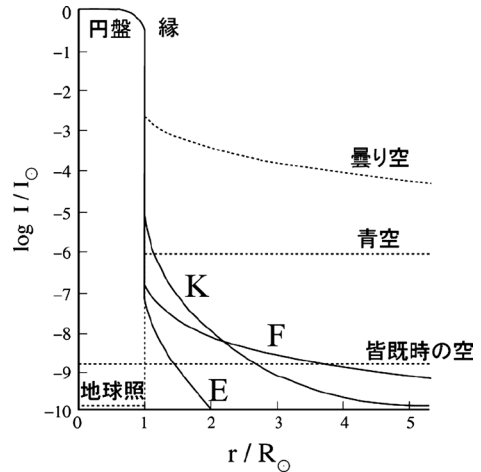


図6 白色光コロナ. 横軸は太陽半径を単位とした太陽からの距離で, 縦軸は太陽面の明るさを単位とした白色光コロナの明るさの対数値 (Stixより改変). Kコロナが自由電子による散乱で光っているもの. Fコロナはダストの散乱で光っているもの. Eコロナは輝線で光っているもの. 点線は上から, 曇り空, 青空, 皆既時の空, 地球照の明るさを示している.

の薄雲がかかっていたようである. 主に市販の機材で撮影した, やや質の悪いデータで, どのようなことまでわかるだろうか.

3.1 太陽の白色光コロナ

太陽のコロナというと, 最近ではX線で撮影した画像の印象が強いだらう (教科書にもエクスキューズなしに色の着いたX線画像が出ている). しかし, 皆既日食時などに観察される**白色光コロナ (white-light corona)**は, X線画像とはまた少し違うものをみている. すなわちX線のコロナは高温ガスの熱放射だが, 白色光コロナは主に太陽光の散乱光である. ただ一口に白色光コロナといっても, 実はいろいろあるので, 簡単にまとめておこう⁶⁾ (図6).

コロナは100万Kもの高温なので, コロナ中の水素はほぼ完全に電離している. その結果, コロナ中には電離した自由電子が大量に存在している. 太陽から放射された光は, この自由電子によって, 綺麗に散乱される (専門的には, トムソン

散乱とか電子散乱と呼ぶ)。しかも、水や氷の散乱と異なり、電子散乱は全く波長に依存せず、太陽の光を完全に平等に散乱する。自由電子が太陽光球の光を散乱することによって輝いているコロナを**Kコロナ**と呼ぶ（Kは**Kontinuierlich**—連続的という意味のドイツ語—頭文字）*1。

一方、惑星間空間には太陽近傍も含め微小な塵（dust）が多数存在している。このダストもまた太陽光を散乱する。ダストの散乱によって生じるコロナが**Fコロナ**である（Fは**Fraunhofer**）*2。Fコロナはそのまま黄道光につながっている。

さらにKコロナやFコロナより輝度は落ちるが、高温コロナ中でさまざまに高階電離したイオンから放射される輝線で光っている**Eコロナ**もある（Eは**emission**の頭文字）。

太陽近傍ではKコロナの明るさはだいたい満月と同じくらいになる。そして、太陽半径の2倍から3倍くらいまではKコロナのほうが明るい、それ以上になるとFコロナのほうが卓越してくる（図6）。また、Kコロナの色は、いわば薄められた太陽光の色であり、地上で観察したときの太陽の色—白色（無色）—に最も近い。

3.2 白色光コロナの撮影と輝度分布

今回、いろいろな機材と諸元で白色光コロナを撮影した。よく撮れた例を以下に上げる。これらの代表的な結果を比較してみよう。

A: Nikon D5100+300 mm 望遠レンズ

ISO1600, F/10, 1/80 秒

B: Fuji Lumix gf3+300 mm 望遠レンズ

ISO100, F/5.6, 1/250 秒

C: Pentax K-r+ミニボーグ60ED

焦点距離: 490 mm (合成)

1ISO100, F/8.2 (合成), 1/125 秒

いろいろな組み合わせで撮影した白色光コロナ

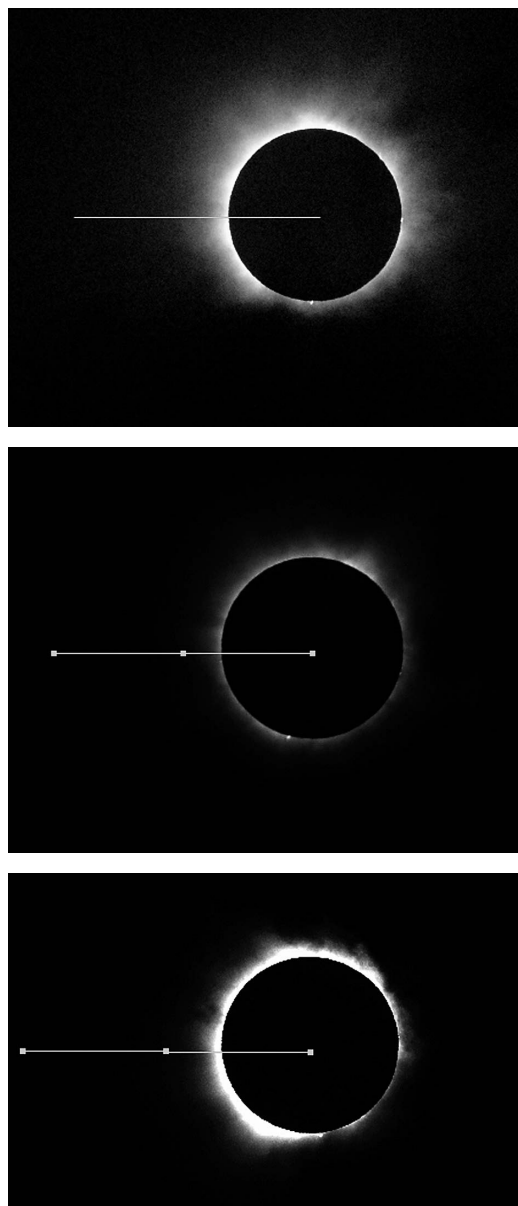


図7 いろいろな機材と諸元で撮影した白色光コロナ。上から、組み合わせA, B, C。雲のない方向にコロナの輝度分布を求めた。図の横線に沿ってコロナの輝度分布を求めた（次図参照）。

*1 もともとの太陽光にあるフラウンホーファー線は、自由電子の熱運動で広がってしまうため²⁾、Kコロナのスペクトルはほぼ連続成分のみになっている。

*2 Fコロナのスペクトルにはフラウンホーファー線は残っている。

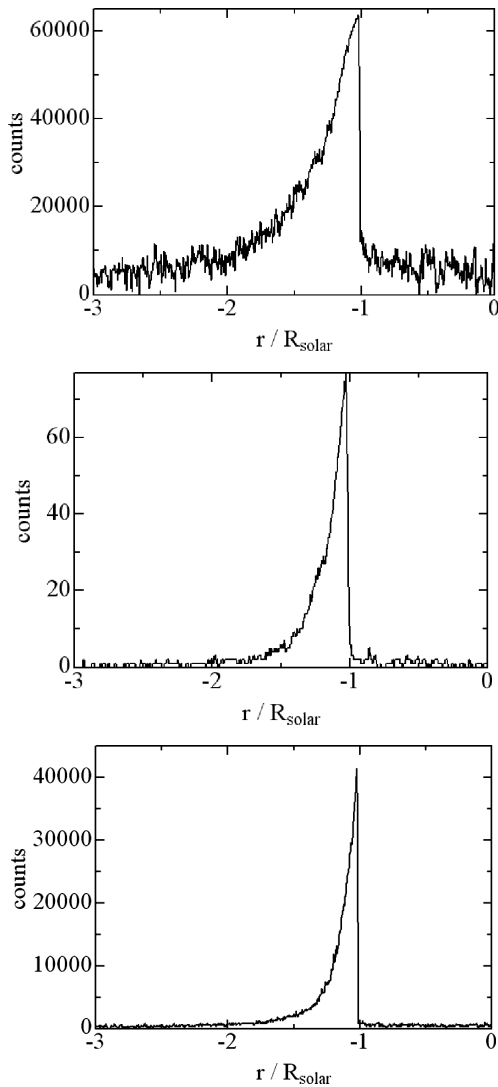


図8 いろいろな機材で撮影した白色光コロナの輝度分布。横軸は太陽半径を単位とした太陽面中心からの距離で、縦軸はカウント数。上から、組み合わせA, B, C.

の写真を図7に示す。ケースCのポータブル小型望遠鏡（ミニボーグ60ED）が、合成焦点距離も500 mm近くあって解像度がいいが、エントリー機種のデジタル一眼レフカメラキット付属の望遠レンズ（焦点距離300 mm）などでも、コロナはもちろんプロミネンスまで写っている。ケースAとケースBは機材のスペックはほぼ同じだが、撮

影諸元、特にISO感度が違う（AはISO1600, BはISO100）。ISO感度が高いとノイズが多くなるので、淡い天体の撮影ではISO感度は小さめのほうがよさそうである（おそらく常識なのだろうが）。

図7の横線に沿って計測した白色光コロナの輝度分布を図8に示す。図8の横軸は太陽半径を単位とした太陽面中心からの距離（右端が太陽面中心、-1が太陽面の端）で、縦軸は生のカウント数である。ケースAはISO感度が高いので、カウント数は多いがノイズも大きい。ISO感度の低いケースBは、カウント数は少ないがノイズも抑えられているのがわかる。小型望遠鏡のケースCは、カウント数も多くノイズも小さい。いずれにせよ、白色光コロナの輝度は、太陽から離れるにしたがい急激に減少していることがよくわかる（後で述べるように、経験的には、おおざっぱに、 r/R_{\odot} の7乗に反比例して減少する）。太陽半径の2倍くらいまで、Kコロナが卓越している領域はだいたい受かっている。それぞれのケースでコロナの同じ場所を測定しているわけではないので、輝度分布には少し違いが見られる。

ここで強調しておきたい点としては、市販のデジタル一眼レフカメラとキットの望遠レンズでも、白色光コロナの輝度分布が十分に得られることである。

なお、今回、図8のカウント数を出す際は、元データをFITSに変換してIRAFで処理した。DarkやFlatなどの専門的処理はしなかったので、ほかの方法やソフトでも類似の結果は得られるだろう。

3.3 輝度分布から電子密度を求める

先に書いたように、Kコロナは自由電子が太陽光を散乱して生じる。太陽光の強度変化はわかっている所以、Kコロナの輝度分布からは原理的には自由電子の密度分布を導くことができる。これは太陽物理学にとっては非常に重要なテーマであり、古くからいろいろな方法が開発されてきた⁷⁾⁻¹⁰⁾。とくに太陽から遠方になるとFコロナが

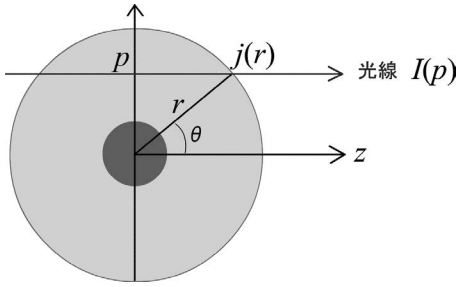


図9 太陽中心の極座標 (r, θ) と、観測面での座標 p の関係。放射率や密度などはおおざっぱには半径 r の関数だが、観測される輝度は p の関数になる。

卓越してくるので、偏光を使ってFコロナ成分を除去する方法⁸⁾が伝統的には使われたようだが、最近では別の方法も提案されている¹⁰⁾。また一般的には、コロナの放射率分布（電子密度の分布）を仮定して輝度分布のモデルを計算し観測と比較するが（順問題）、輝度分布から数学的な逆変換で電子密度分布（放射率分布）を出す方法もある（逆問題）。

以下では、比較的やさしい順問題の方法で、放射率分布（あるいは太陽光の強度と電子密度分布）に単純なモデルを仮定し、輝度分布を計算してみたい。

まず図9のように、観測者方向を z 軸とし、太陽を中心とする極座標 (r, θ, φ) を設定する。また z 軸に垂直方向の座標を p 軸とする。球対称なモデルでは（単位体積単位立体角当たりの）太陽コロナの放射率分布 $j(r)$ や太陽光の強度分布 $J(r)$ そして自由電子の密度分布 $\rho(r)$ などは半径 r の関数だが、観測されるコロナの輝度分布 $I(p)$ は z 軸から距離 p の関数になっている。さらに白色光コロナが太陽光の散乱だけで決まるとすれば、

$$j(r) \propto J(r) \cdot \rho(r) \tag{1}$$

という関係が成り立つ。

太陽光の強度分布は遠方では距離の2乗で落ちるので（太陽表面近傍では少し違うが）、最も単純なモデルとしては、

$$j(r) = j_0 \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^{n+2} \tag{2}$$

または

$$J(r) = J_0 \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^2, \quad \rho(r) = \rho_0 \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^n \tag{3}$$

というべき関数分布が考えられる。ここで、 R_{\odot} は太陽半径で、 j_0, J_0, ρ_0 はそれぞれ太陽表面での値、 n はパラメーターである。

もし白色光コロナが光学的に薄ければ、放射率分布を視線方向に積分したものが、観測されるコロナの強度分布になる^{*3}：

$$I(p) = \int_{-\infty}^{\infty} j(r) dz \tag{4}$$

半径 r の関数を視線 z 方向に積分するのだから面倒そうだが、 z 方向から測った角度 θ に変換すれば解析的に扱える。すなわち、

$$\begin{aligned} r &= \frac{p}{\sin \theta} \\ z &= \frac{p}{\tan \theta} \\ dz &= -\frac{p}{\sin^2 \theta} d\theta \end{aligned} \tag{5}$$

などの変数変換を使って、(4)式の積分を書き換えると、

$$\begin{aligned} I(p) &= \int_{-\infty}^{\infty} j_0 \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^{n+2} dz \\ &= j_0 R_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^{n+1} \int_0^{\pi} \sin^n \theta d\theta \end{aligned} \tag{6}$$

*3 輻射輸送の文脈では、一般的には、源泉関数を S 、光学的厚みを τ 、不透明度を κ とすると、

$$I(p) = \int_{-\infty}^{\infty} S e^{-\tau} \kappa p dz$$

となる。光学的厚みを0とし、散乱だけなので $S=J$ と置けば、本文と同じ式になる。

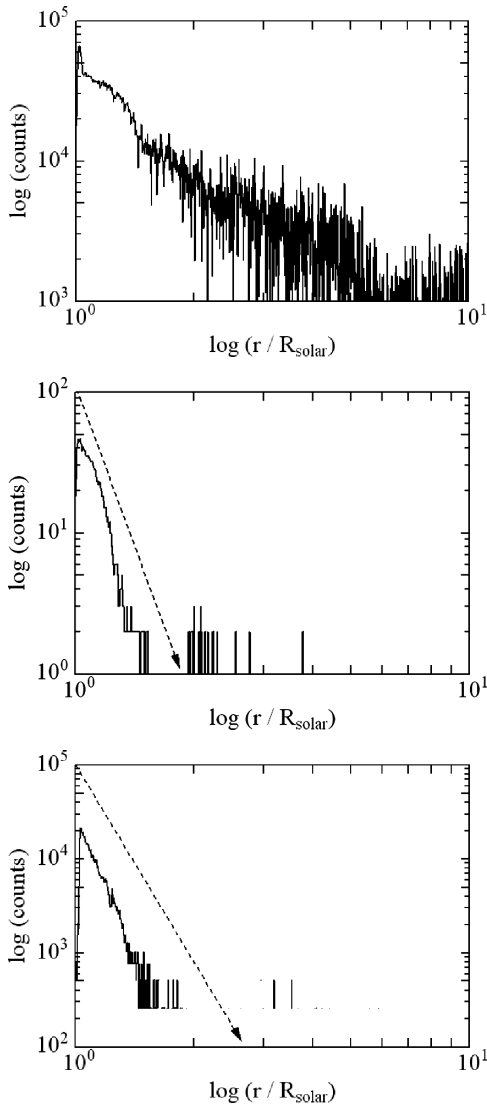


図10 いろいろな機材で撮影した白色光コロナの輝度分布 (対数グラフ). 上から, 組み合わせA, B, C. 破線の矢印は傾き-7の直線を表す. なお, 図8と横軸の向きは逆.

となり, 半径 r のべきを p のべきに引き直すことができる (べき指数が1だけ減少する点に注目). 積分部分は, $n=2$ のときは $\pi/4$ となる (他の n は数学公式集など参照. いずれにせよ, 三角関数の積分なので1のオーダーの数値).

したがって, 簡単な測定法としては, 白色光コ

ロナの輝度分布 (図8あるいは図8を対数にしたもの) に合うようなべき指数を求めることになる.

なお, 教科書⁶⁾ などによれば, 経験的には, 白色光コロナの輝度分布は, I_{\odot} を太陽面での輝度とし, $x=p/R_{\odot}$ として,

$$\frac{I(x)}{I_{\odot}} = 10^{-6} \left(\frac{0.0532}{x^{2.5}} + \frac{1.425}{x^7} + \frac{2.565}{x^{17}} \right) \quad (7)$$

ぐらいになるらしい. 右辺括弧内の第1項はFコロナの寄与で, 第2項と第3項がKコロナの分布を表す ($x=1.061$ で第2項と第3項が等しくなる). したがって, 上の (6) 式と比べると, 指数 n は, 6 と 16 に相当する. またこれから導かれるKコロナの電子密度分布は, n_{e0} を 10^{14} m^{-3} , r を太陽半径で規格化した半径として,

$$n_e = n_{e0} \left(\frac{1.55}{r^6} + \frac{2.99}{r^{16}} \right) \quad (8)$$

ぐらいになる.

図8の輝度分布を対数にしたグラフを図10に示す. 破線の矢印は, だいたい傾きが-7の直線を表している. 市販のデジタル一眼レフカメラでは, きちんとした定量評価までは難しいかもしれないが, 図10でわかる程度のフィットは可能である.

4. デジタル一眼レフカメラの利用

天体は大部分が夜の世界の属するため, 天文学は教育現場では非常に教えにくい分野である. そんな中で, 昼間 (授業時間) に観測できる重要な天体が太陽だ. 従来 (現在) の太陽観察では, 小型望遠鏡+投影板が基本だが, この数年の日食観測経験などに基づき, デジタル一眼レフカメラの利用を勧めたい.

太陽の投影を念頭に, 具体的に利点を比較してみると,

小型望遠鏡 vs. デジタル一眼レフカメラ

操作法	難しそう×	身近で簡単そう○
可搬性	重い×	軽い○
価格	15万円程度	6万円程度
記録	アナログ	デジタル
安全性	△	○

のようになるだろうか。

金環日食の短期連載²⁾⁻⁵⁾でも述べたように、太陽は最も身近な天体であり、天文学習教材として多くの活用法があるだろう。

小型望遠鏡を使った太陽観察については、従来も多くの教材があるが、入手しやすく使い勝手のいいデジタル一眼レフカメラを用いた教材については、まだ活用事例はそれほど多くないようだ。以下、思いつくものをいくつか列挙してみたい。

〈日常の太陽〉

- ・固定撮影による日周運動 (小中)²⁾
- ・拡大撮影による黒点の観察 (小中高)
- ・拡大撮影による太陽周縁減光 (高)
- ・スペクトルの撮影 (高)³⁾

〈日食時〉

- ・固定撮影による日周運動 (小中)²⁾
- ・光度変化 (中高)⁴⁾
- ・金環日食時のスペクトル (高)³⁾

〈皆既日食時〉

- ・固定撮影による日周運動 (小中)²⁾
- ・光度変化 (中高)⁴⁾
- ・白色光コロナの撮影
- ・プロミネンスの撮影 (高)
- ・白色光コロナのスペクトル (高)³⁾

初心者にはハードルが高い小型望遠鏡に比べると、デジタル一眼レフカメラのほうがはるかに使

い勝手がいい。マニュアル撮影の講習など、教育現場で上手に利用するような普及活動が望まれる。日本で皆既日食が観測できるのは2035年であり、機材なども大きく変わっているだろうが、海外での皆既日食もあるので、今回の観測例は参考になることもあるだろう。

参考文献

- 1) 福江 純, 2009, 天文月報102, 693
- 2) 福江 純, 他, 2012, 天文月報105, 636
- 3) 野口 亮, 他, 2012, 天文月報105, 705
- 4) 小倉和幸, 他, 2012, 天文月報105, 777
- 5) 川端美穂, 他, 2013, 天文月報106, 52
- 6) Stix M., 2004, *The Sun: An Introduction* (Springer)
- 7) Grotrian W., 1931, *Z. Astron.* 3, 199
- 8) van de Hulst H. C., 1950, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* 11(410), 135
- 9) Kimura H., Mann I., 1998, *Earth Planets Space* 50, 493
- 10) Hayes A. P., Vourlidis A., Howard R. A., 2001, *ApJ* 548, 1081

Total Eclipse 2012 at Cairns in Australia; Total-Annular Eclipse Project of Osaka Kyoiku University

Jun FUKUE et al.

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

Abstract: Osaka Kyoiku University project team performed the observation of the white-light corona during the total eclipse at Cairns in Australia on November 14 in 2012. We obtained valuable data using digital single-lens reflex cameras with a telephoto lens on the market. We strongly recommend the present method (solar observations with a digital camera) for astronomical education in the classroom.