

# 金環日食で五輪旗を描く

池部 響<sup>1</sup>・奥田 治之<sup>2</sup>・日江井 榮二郎<sup>3</sup>

〈<sup>1</sup>日食愛好家〉

〈<sup>2</sup>宇宙科学研究所名誉教授〉

〈<sup>3</sup>国立天文台名誉教授〉

e-mail: <sup>2</sup>hr-okuda@ra3.so-net.ne.jp, <sup>3</sup>eijiro.hiei@nao.ac.jp

木漏れ日を通して太陽を見て日食を観察することはよく行われている。これは一種のピンホールカメラで、5個のピンホールを通して金環日食を映し出して五輪旗を描くことを思いついた。この考えを日食観測の愛好者に紹介してもらった結果、2019年12月26日のアブダビで見事な五輪旗を描くことに成功した。はじめには奥田、観測は池部、小円孔を使った太陽像は日江井が執筆した。

## はじめに

2012年の5月21日に、広く全国で金環日食が見られた。特に東京、横浜など、関東地方を金環日食帯が通過するという珍しいイヴェントであった。その年は、オリンピックの年でもあった。金環日食であるから、当然、リング状に見える。この光の輪を5個並べて五輪旗を描くことを思いついた。

一番簡単なのは、5個のピンホールを五輪旗の配列に合わせて開けて、それでできる5個のリングで五輪旗を描くというものである。

もうちょっと凝れば、各々の穴に色フィルターをかけ、色つきの五輪旗（赤、青、黄、緑、黒）を描くことも面白い。ただ、この場合、光量が減り、見にくくなることを覚悟しなければならない。色フィルターとしては、透明な千代紙で色つきのもの（セロファン紙）を利用できるが、困ったことは黒色は原理的に作れないことである。これは、他の色で代用することもあり得るが、簡単に手に入る千代紙はすべて4色に限られていることがわかった。仕方なく、ここは、フィルターなしの白色光で代用することにした。ただ、この場合、ピンホールの穴の大きさを同じにすると、像

の明るさに濃淡ができて見苦しい。これを補正するために、穴の大きさを適当に調整して、一様な明るさの像になるよう調整した。これによって像の鮮明度に多少差が出るが我慢することにした。

こう考えてくると、ピンホールカメラ方式で太陽像を描くのは、結構、頭を使わなければならないことがわかった。金環日食を使って五輪旗を描くというのは天文学的（科学的）には何の意味もないので、ちょっと提案することをためらったが、逆に、これを実行するには、さまざまな天文学的な知識や科学的な原理（太陽の視直径、ピンホールカメラの原理、光の直進性、色の選択による減光など）の理解と、種々の難点を克服する工夫など、多くの教育的な側面を持っていると思われ、簡単な理科実験としては意味があるように思って、周辺の人々にも実験を行うことを提案した。

そして金環日食当日は、筆者の一人（奥田）もいくつかの道具を用意して、宇宙科学研究所の近くの小学校で、生徒と一緒に観測を試みたが、あいにくのお天気で観測に至らなかった。その後、あちこちの様子を見たが、外国も含めてこのような試みをしたと言う話は聞かなかった。こんなことは誰でも思いつくことかと思ったので、ちょっ



図1 部分日食の日の出（アブダビ ルブアルハリ砂漠 ティラルリワホテルでの観測風景）。

と意外であった。もっとも、貴重な日食観測にこういうお遊びを考えたのが不謹慎なことであったかもしれない。

時は過ぎ、こんなことがあったことはすっかり忘れていたが、東京オリンピックで世間が騒がしくなってきたので、ちょっと調べたところ、2019年12月26日にはアラビア半島からインド、インドネシア、グアムを通る金環日食があり、2020年6月11日には中国から台湾、グアム島を通る金環日食が矢継ぎ早に起こることを知った。前回の失敗に多少の心残りもあったので、このアイデアを筆者の一人（日江井）に話したところ大変興味を持たれ、お知り合いの日食観測の愛好者の集まりである日食情報センターの大越治氏に紹介していただき、広報誌「日食情報」の紙面で紹介していただいた。

この話を聞いた筆者の一人である池部は2019年12月26日の金環日食を観測するためアブダビに行き、五輪旗の撮影に成功したので、次の章でレポートする。

## 観測

皆既日食に魅せられてはや12年。この間、日食観測のために9回の海外遠征に挑戦するも、コロナもダイヤモンドリングもない金環日食にはそれほどの魅力を感じていなかった、というのが正直なところです。

しかしながら、2019年7月にアルゼンチンに遠征、アンデスの山並みに沈む欠けた太陽を仰ぎ大変感動、今度は欠けた太陽の日の出を拝みたいと

いう気持ちが芽生えました。

しかし、2012年のオーストラリア日食では、海岸線で日の出直後の皆既に挑戦、大量の雲に阻まれ悔しい思いをした経験があります。そこで、2019年12月の金環日食ではアラビア半島の砂漠であれば曇られることはないだろうと、UAEアブダビを観測地とする金環日食ツアーへの参加を決めました。

2019年10月5日都内で開催された日食報告会において、7月の皆既日食の南米への遠征報告、撮影機材やソフトのご紹介の後、日食情報センターの大越治氏より、年末の金環日食観測に向けて著者の一人（奥田）の提案の紹介がなされました。プロジェクターで大きな五輪マークを映し出され「金環日食に行かれる方は、ぜひこれにチャレンジして下さい」と。

部分日食の欠けた像をピンホールを通して文字や図柄を描く遊びは毎回行っていますが、色をつける発想はなく、いままさにこの時期の五輪マーク！ 遊び心満点のご提案に感動、もうこれはやるしかないと大きく心を動かされました。早速カラーセロハンを購入、アルミの薄板に千枚通しで5つの穴を開け小さく切ったセロハンを貼り付けてテストを実施。赤と黄色はきれいに写るものの、青と緑が暗くてハッキリしません。フィルムメーカーによって色調に違いがあるとのこと、入手可能な4社のセロハンを取り寄せピンホール像での色合いを比較、一番明るく投影されるものを選定しました。穴のサイズは当初1~2.5 mmほどで検討するものの、光量が多いほど色が鮮明で



図2 撮影の装備 (左) と使用したピンホール板 (中央), ピンホールの配置 (右).

あったため思い切って5.5 mmまで広げてみました。穴の配置は投影した像と五輪マークを比較しながら調整。およその位置は難なく決まったものの、穴を大きく広げるときにずれが生じやすく、5つの穴をバランス良く配置するのは意外と厄介なことで、何度も試作を繰り返すことになりました。

最終的には横方向20 mm縦方向8 mm間隔で配置したものを採用、作成したピンホールは14 cm四方のアルミ板、横から入る光を遮るため50 cm四方の段ボールを使って三脚に固定することとなりました。なお、像を映し出すスクリーンにはスーツケースを利用、四つ切の画用紙を張り付けました。ピンホールとスクリーンの間にどれぐらいの距離が必要になるかは事前に判断できなかったため、結局は、日食当日に現地で調整、投影した部分日食の像がはっきりして色調が鮮やかに映るポイントを模索しながらスーツケースを動かす、ピンホールからスクリーンまで約1.7 mの距離としました。

待ちに待ったアブダビの朝、空には雲一つない日食日和。欠けた太陽の日の出を愉しみ、食の進行に皆既さながらのワクワク感を味わい、ベイリービーズを経て金環となったそのとき、スクリーンに浮かび上がった鮮やかな五輪マークにほのかな感動と興奮そして達成感を覚えた、令和最初のクリスマス翌日の朝でした。

### 小さな円孔を使った太陽像

本章では、ピンホールの金環日食像で五輪旗を描くことの光学的解説を行う。

光は波動現象の一種であり、その影響が周囲に伝わっていく。光源から直接伝わる1次波の各点を中心として2次の球面波が発生し、その包絡線として波面が拡がるというHuygensの原理に、位相などを考慮してFresnelは回折論を展開した。19世紀初頭、Youngに始まった波動論とNewton以来の粒子論との論争は、鶴田匡夫氏[1]のFresnelの回折懸賞論文という副題のついた光波動論に書かれていて、これを読むと先人の知への情熱が伝わってくる。

非常に遠くに置いた点光源から平面スクリーンに開けた小さな円孔(ピンホール)に単色光を入射させたとき、スクリーン後方の光軸上では明るい点が数か所、いわば多焦点望遠鏡となる。ピンホールカメラでは、その円孔の径が大きいと、光源の像は明るくなるがその径だけ拡がって鮮明さが欠ける。径を小さくすると鮮明さは良くなるが、回折光が効いてボケが拡がる。円孔と像との距離 $f$ を一定にしたとき、像の錯乱円を最小にする円孔の直径は波長 $\lambda$ について $0.86(\lambda f)^{1/2}$ となる。いま $f=1$  m、波長を500 nmにとると、円孔の直径は0.6 mmとなり、 $f=2$  mでは0.86 mmとなる。ピンホールについては光学の教科書[2]に詳述されている。



図3 スクリーンに投影された五輪マーク。

点光源ではなく、太陽のような面光源のピンホール像は、点光源を面積積分し、可視光で観測するときには波長についても積分し、さらに太陽の縁辺効果をも考慮しなければならない。池部さんが使用した円孔の直径は5.5 mmという大きな孔であるので、望遠鏡の性能に使われる Rayleigh の分解能という観点から考えてみる。望遠鏡が分解できる実視角 $\Delta\theta$ は対物レンズの直径を $D$ とすると、 $\Delta\theta=1.22\lambda/D$ で表される。対物レンズの口径5.5 mm、焦点距離1.7 mの望遠鏡は、 $\lambda=500\text{ nm}$ のとき、 $\Delta\theta$ は23秒角（像面では0.2 mm）まで分解できる。2019年12月26日アブダビでの金環日食では、太陽の視半径975.75秒角、月の視半径935.41秒角（相馬充氏による）であり、太陽が約40秒角だけ大きい。これが太陽の環として観測された。

池部さんは対物レンズなしの直径5.5 mm円孔の光学系を使用した。焦点距離は1.7 mであるので、太陽像の直径は約17 mmとなる。今回の金環日食の環の幅は40秒角であり、これは画像上では0.4 mmとなる。結局は回折によるボケは僅かであり、環の幅を決めるのに一番効いているのは円孔の大きさということになり、鮮やかな五輪の環の画像を撮影することができた。

太陽像の明るさ（照度）については直径5.5 mmの円孔から入った太陽光が直径17 mmの大きな像になったので、 $(5.5/17)^2=0.1$ 、つまり地面の照度の10分の1になる。太陽面輝度の縁辺効果は

金環日食の環の幅にもまた波長によっても異なるが、今回の金環日食では太陽面中心輝度の約0.4（波長500 nm）になる。従って像面上での照度は、ピンホール板上の照度に比べて4%となり、さらにセロファン透過率を仮に10%とすると、環の照度は0.4%となる。太陽の輝度は非常に明るいので、ニュートラル・フィルター濃度5（透過率 $10^{-5}$ ）程度を使わないと、太陽を直接見ることは危険である。このことを考えると、暗くはなるが観測可能であろう。大きな段ボールで周りからの散乱光を防いだことも良かったと思われる。

円孔のところにレンズを置いた光学系であればより鮮明な環の像となる筈であるが、五輪旗を撮像するためにはレンズを5個並べなければならない。焦点距離1.7 mのとき、互いにぶつからない対物レンズの口径は約1.3 cmとなり、 $F$ 値は130という暗い望遠鏡となる。

以上、我々の経験を参考にぜひ皆さんにも実験し、オリンピック開催までの時間を楽しんでいただきたい。

### 参考文献

- [1] 鶴田匡夫, 2009, 第8・光の鉛筆 (アドコム・メディア株式会社), 516
- [2] 久保田宏, 1971, 波動光学 (岩波書店), 295

※世界的な新型コロナウイルスの影響でオリンピックは延期されましたが、当記事を天文現象を使った簡単な理科実験の一つとして楽しんでいただければ幸いです。

### An Image of the Olympic Flag Made by an Annular Solar Eclipse

Kyo IKEBE<sup>1</sup>, Haruyuki OKUDA<sup>2</sup> and Eijiro HIEI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Amateur astronomer, <sup>2</sup> Institute of Space and Astronautical Science, <sup>3</sup> National Astronomical Observatory of Japan.

Abstract: Using a five-hole pinhole camera, an image of the Olympic flag was taken at the annular solar eclipse on Dec. 26, 2019.