

天文研究の指導を通じた科学技術人材の育成

宮崎県立宮崎北高等学校
教諭 河野 健太

1. 研究背景

(1) 高校における天文教育の現状

文部科学省による平成27年度公立高等学校における教育課程の構成・実施状況調査によれば、「地学基礎・地学」とともに全国的に開講状況が少ない状況にある(図1)。これは一概にはいえないが、地学専門の教員または地学を指導できる教員が極めて少ない状況を反映している。専門学科の1年生に多く採用されている「科学と人間生活」は物理・化学・生物・地学の4分野を扱うが、それぞれの分野で内容を選択できる。地学分野は「気象・天文」と「地質」から選ぶ場合が多く、宮崎県の場合は東日本大震災の経験や、南海トラフ大地震に備えての影響もあり、地質分野を選択する教員が多い。

以上のことから、高等学校において天文学を扱う場面は少ない。にもかかわらず、多くの学校には指導者が不在のまま高価な天体望遠鏡が設置されている。地学振興のために購入され、そのまま使われなかったものである。宮崎県内だけでも筆者が赴任した3校の他、普通科進学校や特別支援学校でも天体望遠鏡等を確認している。

高等学校での天文研究の大きな利点は、これらの既存施設を有効活用しながら、天文学の課題に挑戦できることである。近年の科学トピックでも重力波の発見、M87銀河のブラックホール撮影成功、はやぶさ2による小惑星リュウグウからのサンプルリターン成功など天文学に関わる研究は盛り上がりを見せており、興味を持つ生徒も多い。天文学の研究はアマチュアの観測に支えられる分野も多く、高校生でも十分に天文研究に貢献できる。

また、天文学の研究は教科横断的な学びにも非常に有用である。天体の運動を扱うのはニュートン力学であり、天体から届く多波長の光は電磁波の知識を要する。得られた各数値の

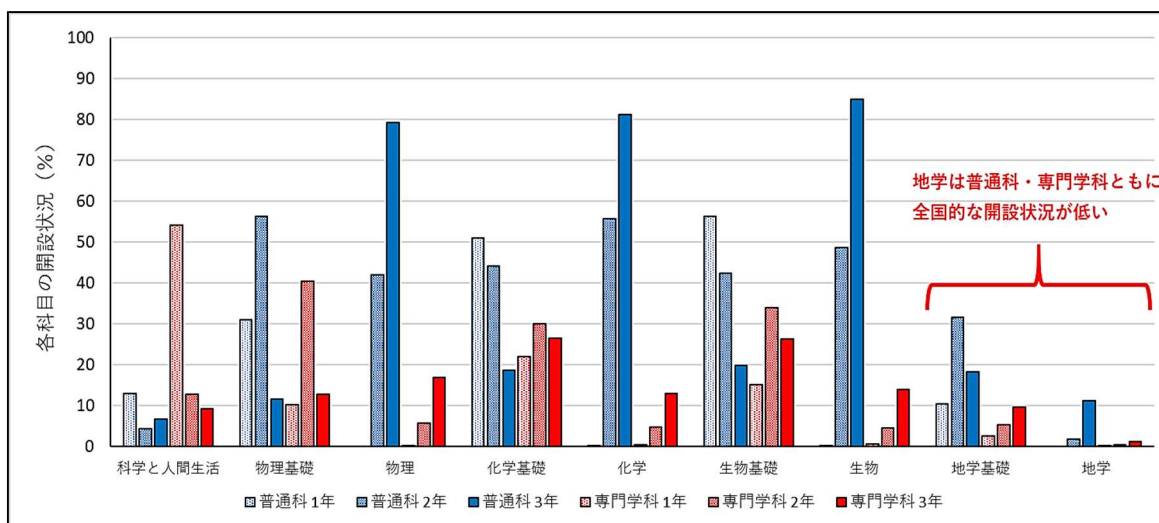


図1 理科の各科目開設状況(平成27年度入学者)

出典: 文部科学省による平成27年度公立高等学校における教育課程の構成・実施状況調査の結果より抜粋し作成

計算には数学と物理の知識を必要とする。星座を巡る惑星の動きなどは「地球から見た宇宙」の視点であり、万有引力による天体の軌道計算などは「宇宙から見た地球」の視点である。現象を異なる立場で考察し、複眼的思考力を身につけられるのも天文学研究の利点である。

（２）探究活動の重視

内閣府の科学技術イノベーション基本計画によれば、科学技術イノベーションによる各国の覇権争いは激化の一途を辿り、世界秩序の再編がはじまっている。気候変動などの世界的課題も現実化してきた中で、世界情勢の変化は急激に進んでいる。

日本は世界情勢の変化に対応するためSociety5.0を掲げており、高等学校では幅広い知識とデジタルの素養を身につけ、これらを活用する思考力と学び続ける姿勢を持った生徒の育成を目指している。探究活動は新しい時代を生き抜く科学技術人材を育成するためにも重要な教育カリキュラムである。

（３）宮崎北高校の探究活動指導

筆者が所属する宮崎県立宮崎北高等学校は、普通科7クラスとサイエンス科1クラスが設置された全日制高等学校である。文部科学省の指定を受け、先進的な理数教育の開発を行うスーパーサイエンスハイスクール（以下SSH）に取り組んでいる。令和4年度はSSH指定第4期の4年目にあたり、研究開発期間は通算で20年目となる。

なかでもサイエンス科は教育開発のパイロット学科であり、ここで開発された教育カリキュラムを普通科に普及していく。また、宮崎県の探究活動コンソーシアムを通じて県内全体へ普及させる役割も担う。サイエンス科の探究活動「科学探究(ACT-SI)」(3年間で4単位)では、3～4人単位でいくつかのチームを組み、1チームが3年間で1つのテーマを研究する。探究活動をスムーズに行うために、データ処理や研究手法に関する「プレ探究活動」を学校設定科目や課外活動として設けている。

筆者はSSH指定第4期1年目から物理教諭として赴任し、主にサイエンス科と科学部の指導、上記のプレ探究活動を含めた教育カリキュラムの開発を行っている。

宮崎北高校の科学部は「探究活動を放課後も行いたい生徒が所属する場」として設けられている。令和4年度は3学年50名の生徒が所属しており、兼部はせずに研究に打ち込んでいる。合計39テーマの指導を物理教諭1名（筆者）と化学講師1名で指導しているが、授業中の探究活動においてはサイエンス科の8名の教員が指導にあたる。

探究活動の意義を重視し、原則として指導者は生徒の研究を手伝わない。基本的には見守り、声掛け、安全確保を主とする。ただし生徒が求めてきた場合には、専門知識の指導を行う。こちらから能動的に働きかけた場合、それは生徒の内発的な学びを阻害する。探究活動の指導においては、生徒研究の進捗状況や困り感の把握と、それに応じた適切な声掛け、論文の添削指導の技術が必要となる。

（４）統計学とプログラミング指導

本校ではプレ探究活動のひとつとして学校設定科目データサイエンス（以下DS）を3年間で2単位設けている。1年生ではエクセルで統計処理を学び、2年生からはプログラミングソフトMATLAB(Math Works社)を使用した画像処理に取り組む。

統計処理では、基本的なグラフ表現やデータの種類、標準偏差、各種統計グラフの意味と

作り方、無相関検定、平均の差の検定を学ぶ。画像処理では、プログラミングによる対象物の面積や個数の検出方法などを学ぶ。いずれも学校独自の動画教材を開発しており、各生徒は動画を視聴した後、それぞれの動画に応じた課題に取り組む。取り組んだ課題は教師との口頭試問を経て合格となる。個別最適化した学びと、教師との対話を中心とした授業となっている。

また、課外活動としてもものづくりを経験する授業「マニファクチャリング（以下MF）」を開講しており、こちらではマイコン Raspberry Pi を扱って生徒自身がデータロガーを作成し、気温や照度などをセンシングできるよう指導している。

現在、本校では DS と MF の教材開発は筆者が行っている。生徒達はこれらのプレ探究活動で学んだ知識と経験を活かして天文学研究に臨む。

2. 研究仮説

先述の通り、天文学の探究活動は教科横断的な学びに向いている。天文現象を「観察して終わり」にはせず、夜間観測という特別な空間で、チームの仲間と協働的に観測したデータから結果を得ることで生徒は探究活動への充実感を感じ、学習の内発的動機づけを起こすと考える。

また、高等学校の「探究活動」において教科横断的な学びを実現し、物理学、数学、統計学やプログラミングなどのデータサイエンスを取り入れた天文研究を指導すれば、科学技術人材の育成に大きく貢献できると考える。

3. 研究目的

指導者が専門的な知識を教え込むのではなく、適切な指導のもとで、生徒自身がこれまでに学んだ知識を応用して天文学研究に取り組めるかを検証する。さらに、本校で開発した探究活動の教育カリキュラムと天文学を組み合わせた際の教育効果の検証も行う。

4. 研究テーマと指導方法

宮崎北高校科学部地学班にて天文研究を指導する。研究テーマは指導者側からは与えず、生徒の興味・関心によって決定する。

2019年から現在まで、毎年1テーマは天文研究を選ぶチームがある（表1）。各研究における指導内容の詳細を以下（1）～（4）に記載する。

表1 宮崎北高校における天文学研究一覧（科学部地学班）

研究タイトル	研究内容	指導期間	統計処理	プログラミング
星食現象の観測と解析 ～正確なデータ取得を目的とした独自観測システムの構築～	月による星食	2019年4月～2022年3月	○	○
宮崎でも部分日食は観測できたか ～曇天時の観測について～	部分日食	2020年4月～継続中	○	○
小惑星による星食現象のCMOSカメラを用いた観測	小惑星による星食	2021年4月～継続中	○	-
地上と宇宙からの多波長同時観測による太陽フレアの予測	太陽フレア	2022年4月～継続中	未定	未定

(1) 月による星食の指導内容

研究期間は2019年4月～2022年3月である。研究チームは4名である。

A. 星食現象の観測と解析

恒星が天体に掩蔽される現象を星食という。掩蔽とはある天体が他の天体に隠されることである。一般に、月による恒星の掩蔽を星食という。小惑星による恒星の掩蔽は小惑星による星食という。これらの現象は月や小惑星の公転によって生じる。

星食観測により月縁地形や小惑星の形状を求められる。また、現在使われている Hipparcos 星表には多少の誤差が含まれており、世界掩蔽観測者協会

IOTA(International Occultation Timing Association)が観測データを収集し、星表の補正に役立っている。日本では、星食観測日本地域コーディネーターJCLO (Japanese regional Coordinator of Lunar Occultation observation)を通じてIOTAに報告できる。

生徒達は二重星であるふたご座 η 星が月の暗縁部から出現する様子を観測した。光度曲線を解析し、2019年10月19日17時01分40.91 \pm 0.10秒 (UT) に1つめの星の出現、2.60 \pm 0.10秒後に2つめの星の出現を確認した (図2)。グラフ中の基準値とは、バックグラウンドの明るさに対する星の明るさの比率を示す値である。なお、詳細は公益財団法人下中記念財団2020年報P.61～66に掲載。

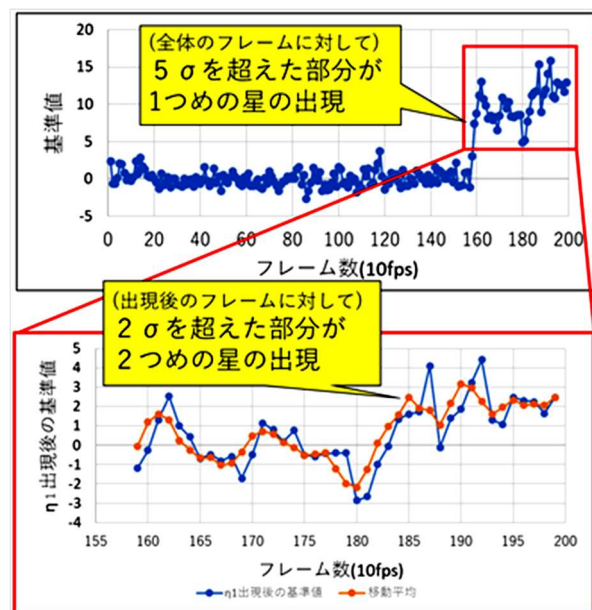


図2 ふたご座 η 星の光度曲線

B. 自動解析プログラムの作成

一般的に使用される星食専用測光用ソフト Limovie は手動で画面上にある測光対象の恒星を指定する。しかし、星雲・星団などを月が通過するときには、画面上で視認できない複数の星食が発生しているはずである。

そこで、観測動画から星を自動検出し、追尾して測光する自動解析プログラムを開発する。開発にはプログラミングソフト MATLAB を使用する。

解析には2020年7月31日に観測した GSC6842.1740 と GSC6842.1723 の星食を使用する。これらは暗縁部への潜入であり1つの動画内で発生する。

観測動画を30分の1秒ごとのフレーム画像に分け、各画像に対して月や字幕を取り除いた恒星のみの2値化画像を作り、各恒星の画像内の座標を算出する (図3)。

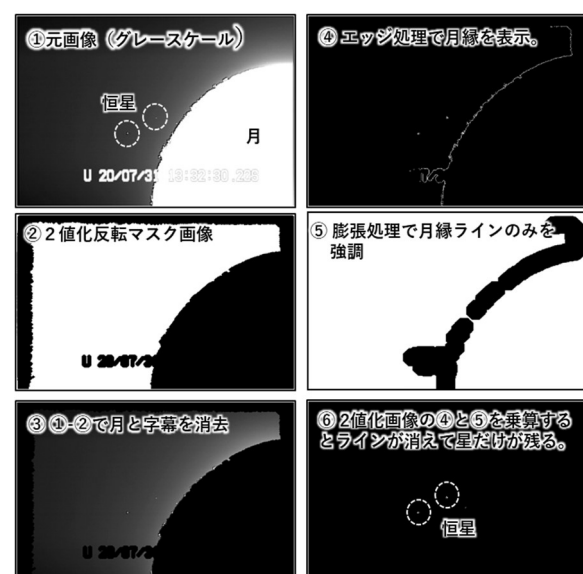


図3 プログラミングによる恒星座標検出過程

このように、画像処理においては2値化処理が基本となる。グレースケール画像では 255 段階の明るさで示される画像情報を、1 と 0 の 2 値のみに調整し、対象物の位置座標を特定する。生徒はその過程で試行錯誤を行う。

同様の処理を動画の全てのフレームに行い、各フレームの恒星の座標を算出する。得られた座標を利用して動画内に写っている全ての恒星を追尾する。もとのグレースケール画像に各恒星の動画内の全てのフレームに同様の処理を行い、各恒星の光度変化をグラフ化する（図4 & 5）。

以上が自動解析プログラムの仕組みである。自動解析プログラムを用いて解析した GSC6842.1740 の潜入時刻は 2020 年 7 月 31 日 13 時 37 分 18.863 秒(UT)であった。また、Limovie で解析した潜入時刻も 2020 年 7 月 31 日 13 時 37 分 18.863 秒であった。開発したプログラムによる潜入時刻と Limovie で解析した潜入時刻との差はなかったため自動解析プログラムにの作成に成功した。

また、GSC6842.1723 は Limovie では暗すぎて測光できなかったが、自動解析プログラムでは測光に成功した。光度が安定しないのは、測光範囲から恒星がずれている可能性がある。これは大気の揺らぎによって発生する動画内の星像位置のずれが原因であると考えられる。

以上のように、高校生の技術と試行錯誤のみで星食現象の測光ソフトを作成し、観測動画から複数の恒星を測光できた。

C. 自作GPS時計の製作

星食観測には正確な時刻データの取得が必要である。近年は GPS 時計を用いることが多い。本校でも本体価格 5 万円の GPS 時計(GPS-CORO)を使用しているが、星食観測普及のため、Arduino でプログラムを組み、安価な自作 GPS 時計の製作を行った。

Arduino とは、入出力ポートを備えたワンボードマイコンである。Arduino 言語を用いたプログラムによって、センサーやアクチュエーターとして機能する。また、オープンソースで様々なライブラリが公開されており、自由に使用できる。今回は GPS 衛星が送る正確な時刻情報を受信し時刻を表示させる。製作には Arduino UNO, GNS 受信機, LCD (Liquid Cristal Display : 液晶ディスプレイ) (16×2 行) を用いる (図 6)。

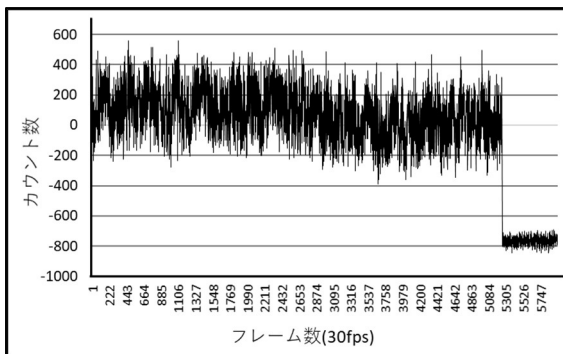


図 4 GSC6842.1740 の光度曲線

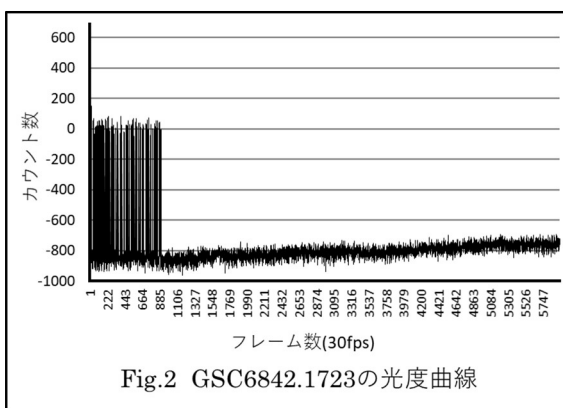


Fig.2 GSC6842.1723の光度曲線

図 5 GSC6842.1723 の光度曲線



図 6 自作 GPS 時計の材料

GNS(Global Navigation Satellite : 全球測位衛星)受信機で時刻情報を入手するプログラムを組む。GNS 受信機の使用には「Software Serial」ライブラリを使用する。また、GPS 衛星から送られてくる信号はそのままでは時刻情報として読み取れないため(図7), 「TinyGPS++」ライブラリを使用して時刻情報に変換する。

この際、得られる年は西暦であり、日付及び時刻は UT(世界時)である。「Liquid Crystal」ライブラリを使用し、得られた信号を LCD に表示する。1 行目に年、月、日を二行目に時、分、秒を表示する。以上のプログラムを組んだ後に Arduino, GNS 受信機, LCD, 可変抵抗器, 3.5 ミリステレオジャックを基盤上に固定し、GPS 時計が完成する。GNS 受信機によって得られた年(西暦), 日付, 時刻(UT)を LCD に表示できた(図8)。

実際の観測では、望遠鏡に CMOS カメラをマウントし、録画はパソコン上で行うため、GPS 時計とパソコン内の時刻を同期させる必要がある。フリーソフト「GPS_Clock」を用いて、自作 GPS 時計とパソコン内の時刻が同期できた。

以上より、月による星食の研究では、①基本的な天体観測の技術、②統計処理の方法、③高校範囲の物理知識を活用した解析と考察方法、④プログラミングによるソフト開発、⑤マイコンを用いた機材開発を指導した。

```

#####Goodnight moon!
,,1.54,0.87,1.28*1A
$GPRSA,A,3,66,76,75,74,72,65,,,,,1.54,0.87,1.28*1E
$GPGSV,4,1,13,193,77,129,27,23,74,208,31,194,69,149,42,20,65,207,
$GPGSV,4,2,13,10,60,301,43,12,53,112,37,50,52,188,31,24,43,041,26
$GPGSV,4,3,13,25,41,169,32,15,26,097,31,32,25,304,47,195,08,170,*
$GPGSV,4,4,13,21,03,313,*4A
$GLGSV,2,1,07,75,73,027,22,65,69,057,25,76,51,213,27,72,36,116,20
$GLGSV,2,2,07,66,24,328,46,74,14,031,30,77,01,212,*58
$GNRMC,080341.000,A,3158.2699,N,13126.1144,E,0.02,0.00,201020,,,E
$GPRVTG,0.00,T,,M,0.02,N,0.03,K,D*39
$GPRZDA,080341.000,20,10,20$GPRGGA,080342.000,3158.2699,N,13126.1144
$GNGLL,3158.2699,N,13126.1144,E,080342.000,A,D*43
$GNSSA,A,3,10,A,3,66,76,75,74,72,65,,,,,1.54,0.87,1.28*1E
$GPGSV,4,1,13,193,77,129,28,23,74,208,31,194,69,149,42,20,65,207,
$GP41,26*7D
$GPGSV,4,3,13,25,41,169,32,15,26,097,31,32,25,304,47,195,08,170,*
$GPGSV,4,4,13,21,03,313,*4A
$GLGSV,2,1,07,75,73,027,22,65,69,057,25,76,51,213,27,72,36,116,20
$GNRMC,080342.000,A,3158.2699,N,13126.1144,E,0.02,0.00,201020,,,E
$GPRGGA,080343.000,3158.2699,N,13126.1144,E,2,16,0.87,49.8,M,29,A,

```

図7 GPS 衛星から送られてくる信号



図8 自作 GPS 時計

(2) 部分日食の照度観測の指導内容

研究期間は2020年4月～継続中である。研究チームは3名である。

A. 部分日食の観測

2020年6月21日に日本全国で部分日食が観測された。宮崎県では2020年6月21日16:00~18:14に発生が予想されていた。部分日食とは、地球から見る太陽が一部欠けて見える現象である。太陽、月、地球が一直線に並び、地球の観測者が月の半影に入った際に観測される(図9)。

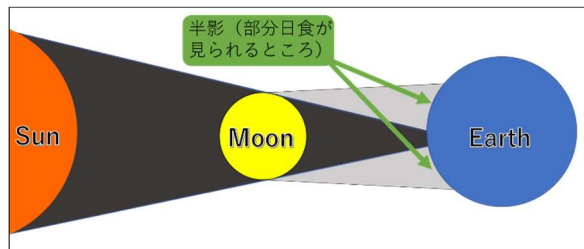


図9 部分日食の仕組み

観測者が本影に入る地点では、皆既日食や金環日食が見られる。観測当日は曇天または雨天の予報となっており、宮崎県内各所で企画されていた日食観測会は中止となっていた。しかし、本校科学部では Raspberry Pi Zero を使用し、照度による部分日食の観測を行った。

Raspberry Pi はイギリスのラズベリーパイ財団によって開発されたシングルボードコンピュータである。オープンソースで様々なライブラリが公開されている。プログラミング言語



図10 Raspberry Pi を用いた照度観測

Python が使用できるため、教育現場での自作プログラムによるセンシング学習に適している。今回は Raspberry Pi 専用の拡張ボード ENVIRO PHAT(Pimoroni 社)を使用する。ENVIRO PHAT はプログラムによって加速度計、照度計、磁力計、圧力計、温度計となる汎用センシングボードである。

今回は 1 秒ごとに照度を計測するプログラムを作成し、雨天に備えて屋根

のある校舎の渡り廊下で観測した (図 10)。なお、太陽方向は壁や屋根に遮られていない。

観測の結果、照度は 17:02 に 1764.6xs まで低下し、17:50 に 24545.2 lxs まで上昇した。その後増減を繰り返した (図 11)。これは部分日食を捉えているように見えるが、正確な減光のピークを捉えているかは定かではない。

そこで、宮崎県で晴天時に日食が起こった際の照度シミュレーションを作成し、減光のピークを比較する。

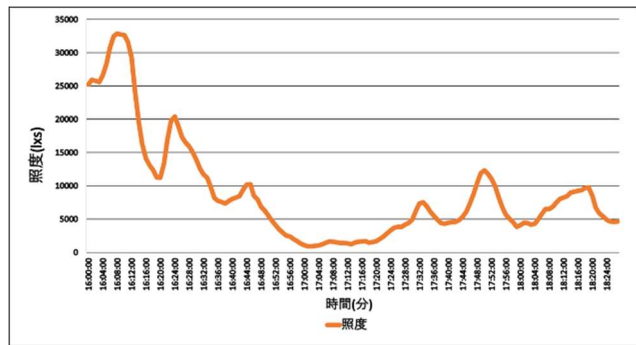


図 11 部分日食時の照度変化

B. 日食シミュレーションの作成

天文シミュレーションソフト ステラナビゲータ 9(Astro Arts 社)から部分日食が発生している 2020 年 6 月 21 日 16:00~18:14 の 1 分ごとの太陽画像を取得する。プログラミングソフト MATLAB を用いて、すべての画像を 2 値化処理し、太陽部分のピクセル数を計測するプログラムを作成する。計測されたピクセル数を太陽の断面積と見做す (図 12)。

地表における太陽の照度は太陽の高度に比例すると考え、単位面積に入る太陽光の断面積を光量として求める。

太陽が天頂にある場合の光量を 1 として、光量の比率を求める。単位面積の半径を r 、太陽高度を θ 、断面積を S とする (図 13)。

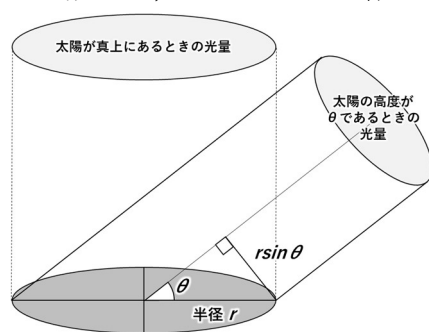


図 13 単位面積あたりの光



図 12 太陽画像からの面積算出過程

太陽の面積と、光量の比率を掛けて部分日食のシミュレーションを作成する。17:30 までに 17.5%減少し、17:31 に 1.7%増加し、また減少し始めた (図 14)。

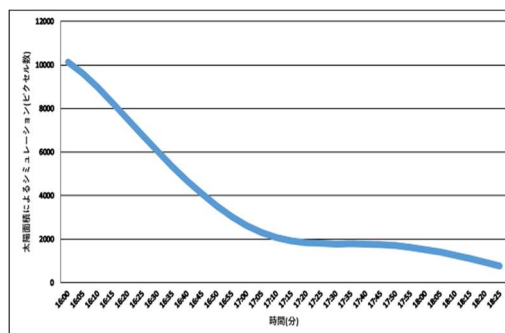


図 14 部分日食の減光シミュレーション

減光シミュレーションではわかりやすい減光のピークは見られず、また、日食終了後の光量の回復が、現実の場合より弱かった。

C. モデル実験

光の散乱を考慮したモデル実験を行い、その実験結果を元にシミュレーションの補正を試みる。直方体のアクリル容器（28.0cm×19.0cm×14.5cm）を用意し、半長軸が 28.0cm、半短軸が 14.5cm の楕円を 4分の1にした形に加工する（図 15）。この形は日中から日没までの太陽光が大気を通過する距離の再現を目指している。ただし、加工のしやすさを優先したため、楕円の半長軸と半短軸の比率は、観測地点における地球大気の日没時と昼間の厚さとは異なる。

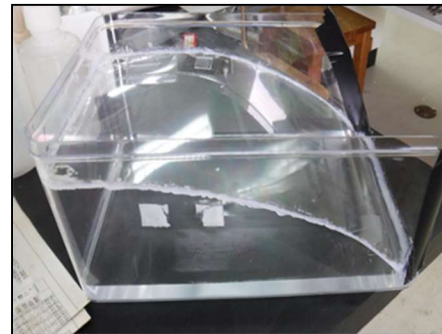


図 15 モデル実験用アクリル容器

液体の床用ワックスを水に溶かし、アクリル容器を満たす。容器の下に照度計を設置し、そこに LED ライトを太陽と見立てて光を当て、位置を変えながら照度を記録する（図 16）。なお、測定は自作の暗室で行う。

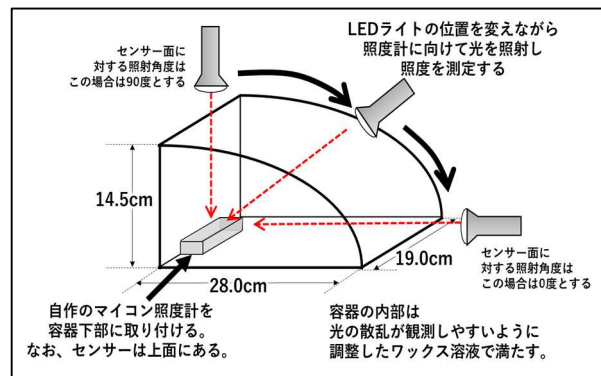


図 16 モデル実験概要図

測定の結果、照射角度を小さくすると、照度も徐々に減少した。グラフ全体のばらつきは大きいものの、照射角度が 25 度より小さくなると減光の傾きが大きくなるように見えた（図 17）。

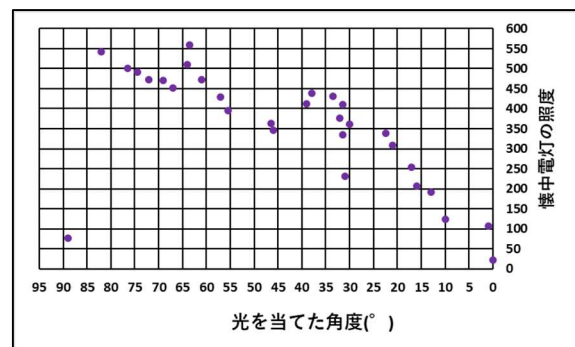


図 17 モデル実験の測定結果

また、日食から 1 年後の 2021 年 6 月 14 日～25 日のうち晴天の 7 日間に日食と同時時間の照度を測定し、光度毎の平均値を示した（図 18）。

モデル実験の結果（図 17）と実際の照度変化（図 18）をフィッティングしたところ、相関係数は 0.65 となり正の相関がみられた。よって、モデル実験では太陽が傾き始めて（高度約 30 度）から日没までの照度変化の様子を、概ね再現できた。

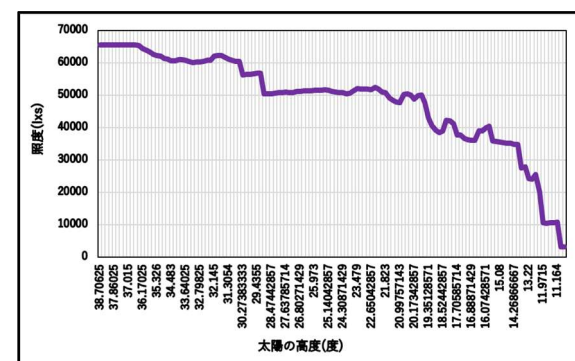


図 18 晴天時 7 日間の照度平均

光の散乱を考慮した光度変化の計算は非常に複雑だが、生徒はモデル実験からシミュレーション補正を行おうとしている。ブレ探究活動の経験を活かして、試行錯誤した結果である。

今後はシミュレーションの補正を行う予定である。

(3) 小惑星による恒星食の指導内容

研究期間は2021年4月～継続中である。研究チームは3名である。

A. 小惑星観測の意義

小惑星探査機はやぶさ2の持ち帰った小惑星リュウグウの試料から、太陽系の起源に迫る様々な情報が得られている。小惑星は火星と木星の間に存在する直径数百m～数十km程度の小さな天体である。小惑星の観測は、太陽系の起源を探るためにも重要な情報となる。通常、これらの小惑星は非常に小さく、地球から可視光で観測することは不可能に近い(図19)。しかし、小惑星の背景に存在する多くの恒星を利用すれば、肉眼では見えない小惑星の大きさを知ることができる。

小惑星が恒星を隠す恒星食を観測すれば、本来は探査機などで調べないと分からないような小惑星の大きさなどの情報が手に入る(図20)。高校生でも天文学の発展に寄与できる。

全国の高校には使われていない天体望遠鏡が複数あり、これらを用いて各地の高校生が星食観測を行えば多くのデータが手に入る。そこで、高校生だけの観測と解析で小惑星の大きさを得ることを目的に研究を進める。

B. 観測方法

観測時間は2021年12月27日18:00~24:00(JST)で、観測場所は宮崎北高校屋上(東経131度26分6.3秒、北緯31度58分14.6秒標高51m)である。

撮影にはニュートン式反射望遠鏡(口径20cm, 焦点距離800mm)を用いる。赤道儀(タカハシEM10)に取り付けて使用する。望遠鏡の接眼部分にはCMOSカメラ(ZWO ASI290MM)を取り付けノートパソコンと接続し専用ソフト(Sharp Cap)で録画する(図21)。

ノートパソコンに繋いだGPS-COROから、GPS信号と共に正確な時刻情報を取得する。動画はAVI形式、30fpsでGain設定は500とする。

今回は、ぎょしゃ座にある11.5等級の恒星TYC 2921-01190-1が小惑星(426)Hippoに隠される。恒星食の予報ソフト(Occult Watcher)の情報

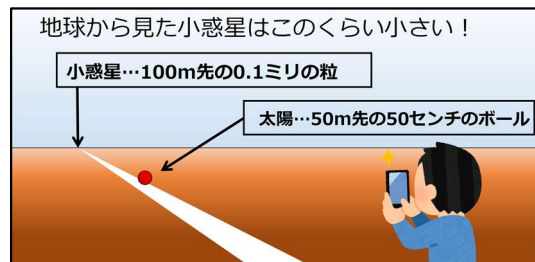


図19 地球から見た小惑星の大きさ

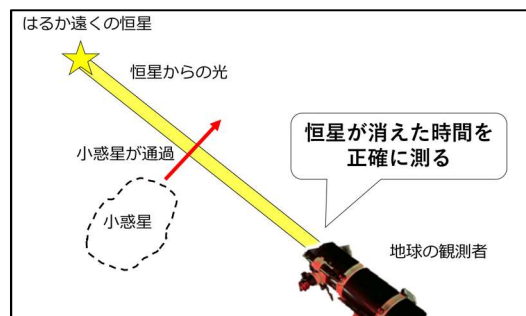


図20 星食観測の概要図



図21 赤道儀にマウントした望遠鏡とカメラ



図22 天文ソフトと実際の星を比較

をもとに、ステラナビゲーターと撮像画面を見比べながら恒星を導入する（図 22）。撮像エリアの写野角は $0.40^{\circ} \times 0.27^{\circ}$ 程度である（図 23）。

C. 観測結果

観測映像から、予報されていた 22:55 ごろに 9 秒間程度、恒星 TYC 2921-01190-1 の減光を確認できた（図 24）。その減光の様子を星食専用測光ソフト「Limovie」を用いて測光し、はっきりとした減光を示す光度曲線を得られた（図 25）。光度曲線の縦軸はカウント数、横軸はフレーム数である。カウント数は CMOS カメラが検出した光子数を示す値で、天体の明るさを意味する。横軸は 1 秒間に 30 フレームで撮影したことを示す。

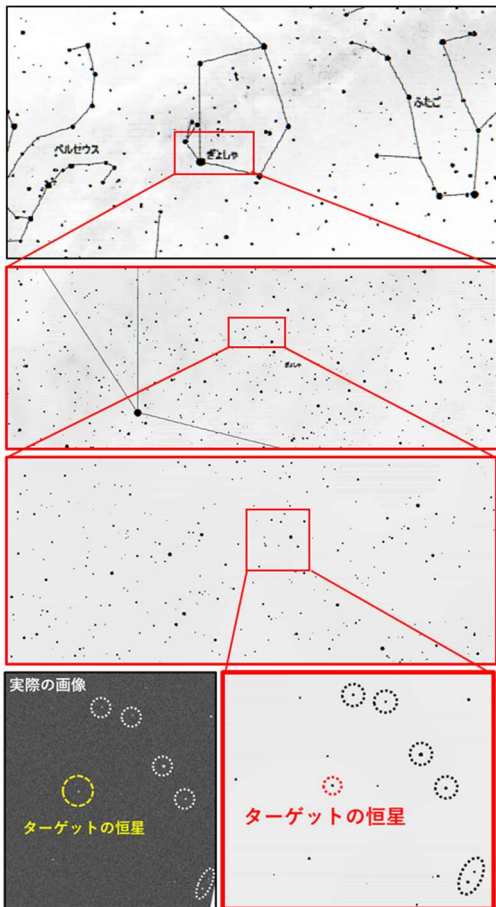


図 23 ターゲットの恒星の位置

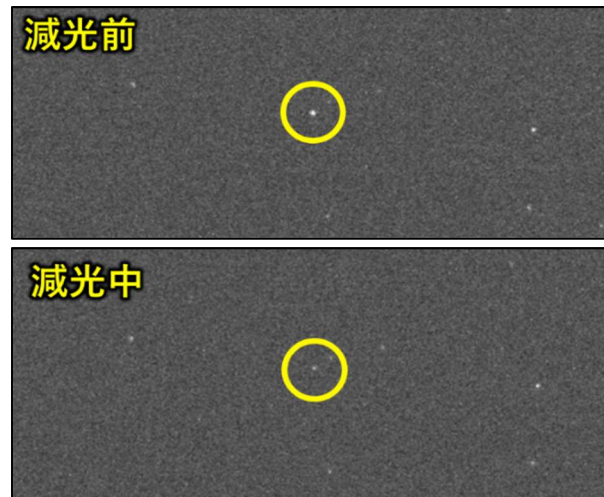


図 24 減光中の恒星

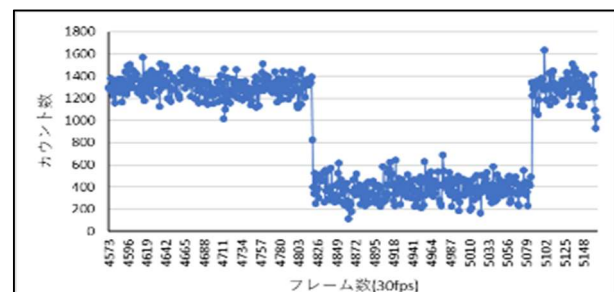


図 25 減光中の恒星の光度曲線

D. 減光時間の算出

光度曲線において、明確に減光を示す時刻を求める。4820 フレーム目の点が入り、減光前と減光後の間にあったため、どちらに含まれるか統計処理を用いて判断する。

減光前である 4573～4806 フレームの平均カウント数は 1305.825 である(式 1)。

$$\frac{(4806-4573 \text{ フレームのカウント数の和})}{(\text{フレーム数})} = 1305.825 \quad \dots(\text{式}1)$$

また、4573～4806 フレームのカウント数の標準偏差は 89.761 である(式 2)。

$$\sqrt{\frac{(\text{各フレームのカウンタ数}-\text{平均カウンタ数})\text{の平方和}}{(4806-4573)-1}} \cong 89.761 \quad \dots(\text{式}2)$$

4820フレーム目のカウンタ数と平均値のずれを標準偏差で割る。これを基準値と定めると、基準値は -5.4σ であった(式3)。

$$\frac{876-1305.825}{89.76063} = -5.4\sigma \quad \dots(\text{式}3)$$

この減光量は、大気のゆらぎによるシンチレーション(星のまたたき)が原因とは考えにくいので、4820フレームの値は恒星食による減光だと考えられる。

よって今回は、22:55:50.988 \pm 0.015~22:55:59.855 \pm 0.015(JST)に8.867 \pm 0.015秒間の減光を確認できた。この結果は日本星食観測ネットワークに報告した。

日本星食観測ネットワークの広瀬敏夫氏によれば、今回の我々の観測結果より小惑星 Hippo の直径は 125.3km 程度であると報告された。このように各地の観測結果を集めて、小惑星の直径を算出することをデータの整約という。しかし、データの整約には高度な専門知識が必要である。そこで、まずは高校物理・高校数学で学んだ知識を用いて、観測結果を基に独自に小惑星の大きさを求めることに挑戦する。

E. 小惑星の大きさの算出

観測した小惑星の大きさを求めるためにケプラーの第2法則(式4)と万有引力位置エネルギーを含むエネルギー保存則(式5)を用いた(図26)。

$$\frac{1}{2}rv = \frac{1}{2}Rv' \sin\theta \quad \dots(\text{式}4)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{Mm}{r} = \frac{1}{2}Rv'^2 - G\frac{Mm}{R} \quad \dots(\text{式}5)$$

r = 近日点での小惑星の日心距離

v = 近日点での小惑星の速度

R = 観測時の小惑星の日心距離

v' = 観測時の小惑星の速度

θ = 観測時の小惑星の速度ベクトルと日心距離方向のなす角度

m = 小惑星の質量

M = 太陽の質量

G = 万有引力定数

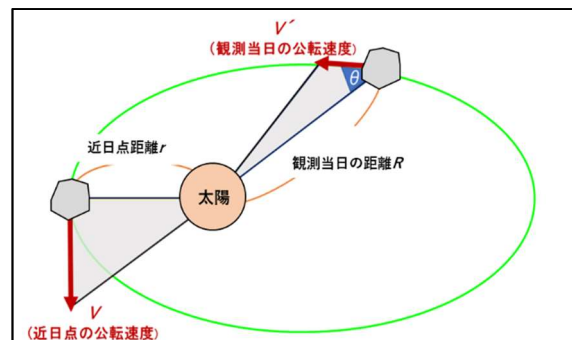


図 26 ケプラー第二法則

まず角度 θ を求める。Hippo の公転軌道を 2 兆分の 1 に縮小したものを模造紙に書き、当日の日心距離を天文シミュレーションソフトで参照し、縮小した公転軌道上に書き込む。小惑星の位置を接点として公転軌道の接線を引いて角度を計測し、 $\theta = 84^\circ$ を得た。

次に、エネルギー保存の法則を用いて観測時の小惑星の速度を求める。求めた角度と(式4, 5)より $v' = 17.789 \text{ km/s}$ となった。

この速度に減光していた 8.867 ± 0.015 秒を掛けて小惑星の大きさを求めると、 $157.735 \pm 0.533 \text{ km}$ を得られた。しかし、この値は JOIN による報告よりも約 32.4 km 大きく、ずれが激しい。

太陽から見ると、地球と小惑星は両方動いている。そのため、地球からの観測結果を用いて小惑星の大きさを算出するには地球から見た小惑星の相対速度が必要である。

観測時の地球の公転速度を、同じくケプラーの第2法則と万有引力による位置エネルギーを用いて計算すると 29.999 km/s であった。これにより地球と小惑星の相対速度を求めると 12.21 km/s であった。

この値に星食の継続時間 8.867 ± 0.015 秒を掛けて小惑星の大きさを求め、 $108.266 \pm 0.183 \text{ km}$ を得た。今度は JOIN による報告よりも約 17.0 km 小さくなってしまった。

宇宙空間を進む地球と小惑星はともに3次元空間を移動しており、その相対速度も平面的ではない。そこで、 x, y, z 軸方向で立体的に相対速度を考える。

3次元空間で考える際には、天体の公転軌道が黄道面に対してどれほど傾いているかを示す軌道傾斜角など、太陽・地球・小惑星の位置関係を示す値が必要である。文献調査によって小惑星Hippoの軌道傾斜角は 19.54° (図27)、太陽・地球・Hippoの三つの天体がなす角度である太陽離角は 156.05° であるとわかった (図28)。

軌道傾斜角と太陽離角を基にしてHippoと地球それぞれの3次元ベクトルを考える。太陽から見た地球の速度 v_{Ex} を x 軸方向に取る。太陽から見た小惑星の速度 v_H を v_{Hx}, v_{Hy}, v_{Hz} の速度ベクトルに分解する。 v_H は観測で得た値 17.789 km/s である。 19.54° はHippoの軌道傾斜角、 84° はHippoが太陽方向と楕円軌道の接線方向でなす角である。 v_{Hx}, v_{Hy}, v_{Hz} は以下のように求めた。

$$\begin{aligned} v_{Hx} &= 17.789 \times \cos 19.54^\circ \times \sin 84^\circ \\ &\doteq 16.672 \text{ km/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{Hy} &= 17.789 \times \cos 19.54^\circ \times \cos 84^\circ \\ &\doteq 1.752 \text{ km/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{Hz} &= 17.789 \times \sin 19.54^\circ \\ &\doteq 5.949 \text{ km/s} \end{aligned}$$

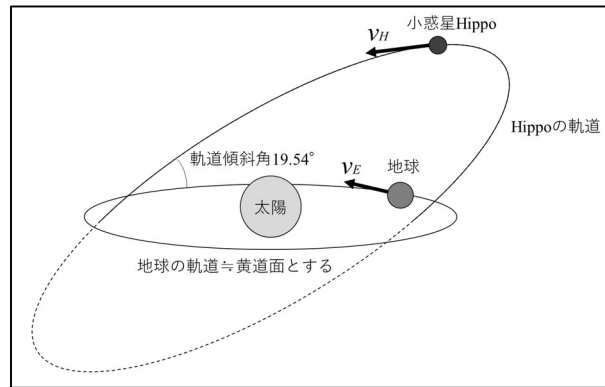


図 27 小惑星 Hippo の軌道傾斜角

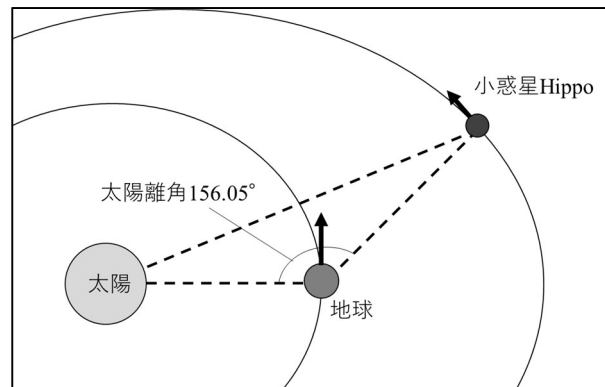


図 28 太陽・地球・小惑星の位置と太陽離角 (黄道面を真上から見たとき)

地球の場合は離心率が0.016697，軌道傾斜角が0.002°であり，共に0とみなせるほど小さいため，今回は0とし地球の軌道面と黄道面を同一面と扱い， v_{Ex} 以外の y, z 軸方向のベクトルの値を0とする（図29）。 v_{Ex} 値は，観測時の地球の公転速度29.999 km/sである。

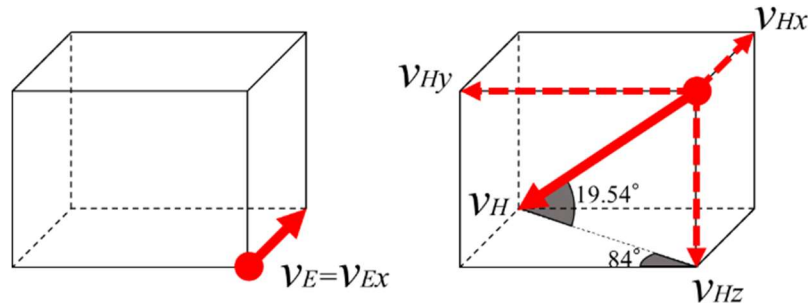


図 29 3次元で表された天体の速度（左が地球，右が小惑星 Hippo）

以上より，地球から見たHippoの相対速度 v_{EH} を求めた。

$$v_{EH} = \sqrt{(v_{Hx} - v_{Ex})^2 + (v_{Hy} - v_{Ey})^2 + (v_{Hz} - v_{Ez})^2} \cong 14.615 \text{ km/s}$$

v_{EH} に観測した恒星食の継続時間 8.867 ± 0.015 を掛けて小惑星の大きさを求め， $129.599 \pm 0.219 \text{ km}$ を得た。

JOINによって報告された値より約4.3km大きいものの，かなり近い値を得られた。

（4）太陽の多波長観測の指導内容

研究期間は2022年4月～継続中である。研究チームは3名である。

A. 太陽フレアと太陽活動について

太陽は11年周期で活動が活発になる。近年，黒点が多く発生しており太陽活動が活発な時期である。

また，太陽光球の黒点付近で発生する爆発現象である太陽フレアの発生も増加している。太陽フレアには，有害な放射線や強力な磁力線が含まれており，衛星のトラブルや電子機器の故障，GPSの誤差の増大，通信障害，大規模停電を引き起こすことが分かっている。太陽フレアは発生したフレアの規模によって，小規模な方からA, B, C, M, Xの順にクラス分けされている。

なお，太陽黒点にはNOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration：米国海洋大気局)よりNOAA番号が割り振られる。

B. 太陽の構造と各領域の波長

太陽は内側から中心核，放射層，対流層，光球，彩層，コロナの順で構成されている。太陽フレアは太陽の最も外側にある高温（約100万K）のコロナで発生する。コロナはX線を放射するが，そのX線は地球の大気によって吸収されるため地上では観測できない。また，光球の温度は約6000Kで，白色光を観測する。彩層の温度は約1万Kで，水素輝線（ $H\alpha$ 線）を観測する。

C. 「ひのでといっしょ」について

X線は地上から観測できないため「ひので衛星といっしょに太陽を観測しよう2022」プロジェクトに参加して観測をおこなった。ひので衛星とは太陽フレアやコロナ内部の爆発現象を解明するために2006年に打ち上げられた太陽観測衛星である。可視光磁場望遠鏡，極紫外線撮像分光装置，X線望遠鏡が搭載されており，光球から彩層，光球あるいは彩層とコロナの間，高温のコロナの観測をしている。

このプロジェクトは，太陽観測衛星「ひので」が日本時間の日中に合わせて太陽を撮影し，それに合わせてほぼ同時刻に高校生が太陽観測を行う企画である。「ひので衛星といっしょに太陽を観測しよう2022」の期間は2022年8月22日から8月29日であった。

太陽フレアは黒点付近で発生することがわかっており，光球の黒点の状態から太陽フレアを予測できるのではないかと考えた。

D. 地上観測の機材

光球の観測は反射式望遠鏡(焦点距離1000mm，口径100mm)で行い，彩層の観測は太陽観測専用望遠鏡CORONADO P.S.T.(焦点距離400mm，口径40mm)で行った。2つの望遠鏡ともVixen GPD赤道儀に取り付けている(図30)。光球の撮影は一眼レフカメラ(Canon EOS kiss X5)を使用し，彩層の撮影はCMOSカメラ(ZWO社のASI290MM)を使用する。



図 30 反射式望遠鏡と太陽望遠鏡をマウントした赤道儀

E. 観測方法

赤道儀で太陽を追尾し，2022年8月22日から8月31日にかけて日中の12時30分と夕方の17時30分(いずれもJST)の2回に分けて，宮崎北高校屋上で観測，撮影する(図31)。光球は一眼レフカメラを用いてISO感度100，露出時間6.25msで撮影する。彩層はCMOSカメラにてゲイン150，露出2.3msで撮影する。彩層の撮影ではCMOSカメラの撮像素子のサイズが小さいため画角が大きく取れず，彩層の画像は太陽の一部の撮影に留まった。



図 31 屋上にて観測する

地上観測で撮影した画像と，人工衛星ひのでが観測したX線画像を比較する。

F. 観測結果

今回はNOAA13088領域にて，8月27日と8月29日にMクラスフレアの発生を観測できた。同じ領域で2回のフレアが発生した。

8月27日の光球面では目立つ黒点が2箇所観測されており，太陽の南方向の黒点が特に大きく発達していた。この領域はNOAA13088と名付けられ，撮影期間中にM4.8クラスの太陽フレアが発生した。彩層でもプラージュと呼ばれる一際明るい白色光が確認された。X

線では激しく輝く様子が捉えられている。一方，8月27日の光球面で太陽の北方向の黒点はNOAA13085と名付けられ，彩層ではプラージュとダークフィラメントが観測されている。X線では激しい輝きは見られない（図32）。

8月29日には，太陽の縁に移動したNOAA13088領域にてM6.7クラスフレアが発生し，宇宙空間に伸びていくX線の激しい輝きが観測された。光球面では，黒点が太陽の縁に移動したため目立った特徴は見られないが，彩層ではX線で観測された輝きと似た形で，宇宙空間に伸びるプロミネンスがうっすらと観測された（図33）。

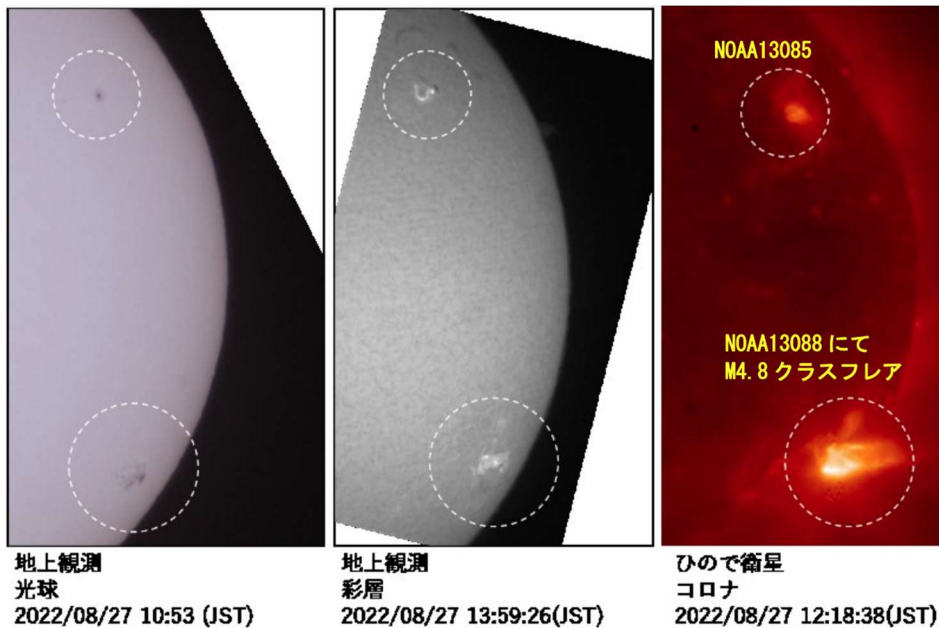


図 32 8 月 27 日の各波長の観測結果（左から順に白色光，水素輝線（H α 線），X 線）

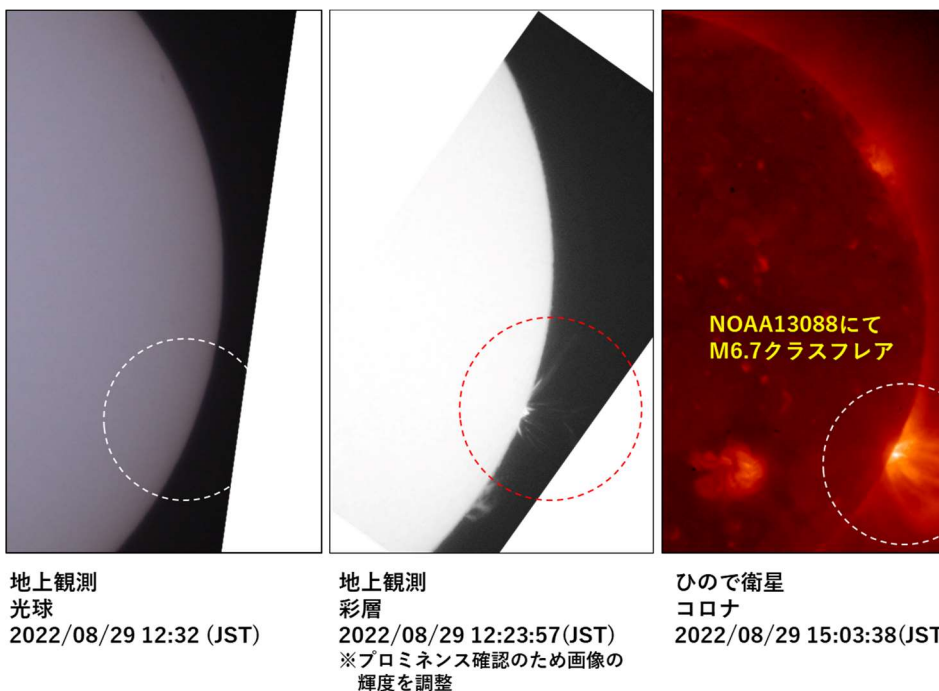


図 33 8 月 29 日の各波長の観測結果（左から順に白色光，水素輝線（H α 線），X 線）

いずれも太陽フレアが発生したのは NOAA13088領域のみである。両日を比較すると、29日の方がフレアの規模は大きい。

NOAA13085とNOAA13088の違いは、黒点の面積である。画像からは、明らかに後者の黒点の方が大規模であることがわかる。太陽フレアの発生は、ある程度規模の大きい黒点の発生と関連しているものと考えられる。

(5) 地域貢献活動

学校内だけでなく、地域の関連施設を利用した各種のイベントへの参加、出前講義、出張観測会等を通じて地域社会と連携することは、地域の小中学生への啓蒙活動としても重要であるし、生徒自身の能力向上のうえでも、意義深いものであると考える。

A. 宮崎科学技術館との連携

宮崎科学技術館には全国有数の直径を誇るプラネタリウムがある。毎年、様々な天文イベントが開催される。筆者はこのプラネタリウムで10年前から年に1回程度「星空と音楽の夕べ」にて星の話を担当し、生徒の研究内容などを一般の方にわかりやすく解説している(図34)。

また、毎年夏休みに開催される「科学の祭典」では、科学部地学班も出展者として参加し、太陽観測会を行っている。2022年は8月6日～7日に9:00～15:00まで行った(図35)。

2022年10月8日～9日は宮崎科学技術館35周年記念行事の中で開催された天体観望会では科学部地学班に対して主催の依頼があった。これまでの生徒との活動が認められた証拠である(図36)。

B. 地域との連携

筆者は地域貢献活動の一環として、近隣の施設での出前講義や出張星空観望会を行っている。科学部の生徒もスタッフとして参加し、天体望遠鏡の扱い方を指導する。

コロナ禍のため観望会などのイベントは3年間に亘って自粛されていたが、2022年度から少しずつ再開されてきた。8月4日には宮崎県



図34 「星のお話」の案内
宮崎科学技術館ホームページ告知より引用



図35 高校生による太陽観測会



図36 高校生によるお月見会



図37 みやざきサイエンスキャンプ

教育委員会が主催し、宮崎県内の科学好きの中高生が集まる「みやざきサイエンスキャンプ」にて夜の星空観望会を担当した（図 37）。

4. 結果

本研究の目的のひとつは、天文研究によって科学リテラシーを持つ科学技術人材を育成することである。これまでに生徒が行った研究発表と受賞実績などを、以下にまとめた。

（1）月による星食の指導

第64回日本学生科学賞 日本科学未来館賞など全国大会での受賞2件、九州生徒理科研究発表大会優秀賞など九州大会での受賞2件、宮崎県大会での受賞6件など、3年間で10件を受賞した。プログラミングソフトを完成させるなど粘り強く活動した。研究班4名中3名が推薦入試にて研究成果を紹介し、工学系の4年制国立大学へ進学した。また、夏季休暇中に高校まで足を運び、後輩指導に参加する姿が見られた。

（2）部分日食の照度観測の指導

第13回坊っちゃん科学賞研究論文コンテスト（東京理科大学主催）入賞など全国大会で受賞2件、九州生徒理科研究発表大会優秀賞など九州大会で受賞2件、宮崎県大会で受賞2件など、3年間で6件を受賞した。プレ探究活動で学んだマイコンを活用して照度による観測システムを創り上げた。

（3）小惑星による恒星食の指導

宮崎県サイエンスコンクール県教育長賞、第66回日本学生科学賞宮崎県代表、九州生徒理科研究発表会地学部門代表など、宮崎県内で3件を受賞し、全国大会や九州大会へ出場予定である。先輩が行った「月による星食観測」を発展させて、さらに難易度の高い観測に挑んだ。小惑星の星食観測は天体望遠鏡を扱う技術が必要なため、星空観望会スタッフとしての活動がスキルを育んだ結果である。

（4）太陽の多波長観測の指導

JSEC2022（高校生・高専生科学技術チャレンジ）に論文を応募するも受賞には至らなかった。しかし、1年生にして研究論文の執筆作業を経験した。これは地学班の中では最も早い。今後は太陽フレアが生物に及ぼす影響を調査する予定である。

（5）地域貢献活動

宮崎科学技術館 35 周年記念事業で星空観望会の依頼を受けるなど、地域にも宮崎北高校科学部地学班の活動が周知されてきた。

複数の星空観望会を経験し、生徒には天体観測技術が身についた。先輩から後輩への指導も活発である。また、他県の学校から 2022 年 11 月 8 日に発生する皆既月食の共同観測の声がかかるなど、全国的に活躍が認知されてきた。

5. 指導方法に関する考察

各研究班に対して、解析方法やプログラミング方法は直接答えを教えることなく、毎回進捗状況の報告をさせ、その時点の問題点を明らかにして解決方法を考えさせた。

例えば、月による星食観測に関しては、生徒が測光ソフトを開発するためにプログラミン

グの勉強も含めて約1年6ヶ月を要したが、完成の際には大きな自信を得た。作成した生徒は、推薦入試で情報工学系へ進学し、現在も活躍している。

また、研究発表会やポスターセッションに積極的に参加しているため、コミュニケーション能力が向上している。天文研究は他校生徒の興味を惹きやすく、説明する機会が多くなる。地域への星空観望会への参加も同様で、一般の方にわかりやすく天体の説明を行い、その経験がわかりやすい研究発表作りに活かされている。

研究を進める過程で、生徒は積極的に教科横断的な学びを取り入れた。指導中の声かけを行う場合には生徒が論理的思考を身につけられるよう、「なぜ」や「どのように」を大切にした。生徒は自身の持つ知識を活かして解析を行い、それが教科横断的な手法に繋がった。

以上のことから、これまでの研究は、①天体観測技術の向上（知識・技能の向上）、②教科横断的な解析技術（思考力・判断力の向上）、③ICT活用技術の向上、④発表会や星空観望会によるコミュニケーション能力の向上（表現力の向上）に役立ち、科学技術人材の育成に大いに役立ったと考えられる。

生徒の受賞成果よりも探究の過程が重要であることはいうまでもないが、受賞は生徒のモチベーションの向上と更なるステップアップにつながるし、後輩生徒の目標ともなって、研究の質の向上に繋がる。1年生が太陽観測で論文を執筆できたのはその一例である。

今後もあらゆる教育方法を吟味しながら複合的に科学技術人材の育成を目指したい。

参考文献

- 1) 小林和宏, 高校における地学教育の現状-新教育課程を迎えて-, 地学教育と科学運動70号, 2013年
- 2) 広瀬敏夫ら, 天体観測の教科書-星食・月食・日食観測編-, 誠文堂新光社, 2009年
- 3) ダニエル・フライシュら, 算数でわかる天文学, 岩波オンデマンドブックス, 2014年
- 4) 長谷川一郎, 天体軌道論, 恒星社厚生閣, 1986年
- 5) 文部科学省, 平成27年度公立高等学校における教育課程の編成・実施状況調査の結果について
- 6) 相馬充ら, 星食ハンドブック2020, 星食観測日本地域コーディネーター, 2020年
- 7) IOTAホームページ <http://www.lunar-occultations.com/iota/iotandx.htm>
- 8) 早見勉氏によるホームページ「HAL星研」 <http://www.hal-astro-lab.com/>
- 9) 矢治健太郎氏によるホームページ「ひので衛星といっしょに太陽を観測しよう2022」
<http://hinodetoissho.midorikiseki.com/>
- 10) 令和元年度指定スーパーサイエンスハイスクール研究開発実施報告書第2年次および第3年次, 宮崎北高校教育開発部, 2021年~2022年
- 11) 森岡怜生ら, 星食現象の独自観測・解析システムの構築, 宮崎北高校科学部研究論文, 2021年
- 12) 菊池慶祐ら, MATLABによる星食現象自動解析プログラム, 宮崎北高校科学部研究論文, 2022年
- 13) 桑引陽糸ら, 宮崎でも部分日食は観測できたか, 宮崎北高校科学部研究論文, 2022年
- 14) 岩尾恒音ら, 小惑星による恒星食の観測と解析, 宮崎北高校科学部研究論文, 2022年
- 15) 福山 彪賀ら, 地上と宇宙からの多波長同時観測による太陽フレアの予測, 宮崎北高校科学部研究論文, 2022年



河野 健太
(この けんた)

<略歴>

- 2010年 宮崎大学大学院工学研究科
応用物理学専攻 修了
- 2010年 高千穂学園小林西高等学校
勤務
- 2013年 宮崎県立都農高等学校勤務
- 2017年 全国高等学校文化連盟自然科学専門部宮崎県理事
(2019年まで)
- 2019年 宮崎県立宮崎北高等学校勤務
- 2022年 宮崎県高等学校等教育研究会理科部会物理部長

<主な研究歴>

- 1) 「高校生によるモデルロケットの打ち上げについて」, 第54回九州高等学校等理科教育研究会長崎大会, 2016年
- 2) 「高校生への星食観測指導と天文学への貢献」, 公益財団法人下中記念財団2020年報
- 3) 「思考力と主体性を育成するマニファクチャリング～課題解決学習の開発・実践～」
第49回全国理数科教育研究大会, 2021年

<勤務校>

宮崎県立宮崎北高等学校
〒880-0124 宮崎県宮崎市大字新名爪4567
電話 0985-32-1288