

# 高校生への星食観測指導と天文学への貢献

宮崎県立宮崎北高等学校  
河野 健太

## 1. 研究の目的

### (1) 教育現場における天文活動

高等学校理科の教育現場では、地学分野に関する教育が十分であるとは言い難い。特に天文学においては、指導者も少なく夜間活動が多いため深く学ぶことは希である。

しかし、天文学において、天体の運動解析を学習する際には物理学の知識が応用できる。星座などの天球上の移動に代表される「地球から見た天体の動き」と、万有引力の計算に代表される「宇宙から見た天体の動き」など視点や考え方の切り替えも必要となり、学習活動の題材としては大変魅力的である。授業で扱うことが難しくても、探究活動の題材としては大変有効であると考ええる。

全国的に高校で取り組まれている天文活動としては、観望会の他に太陽観測、月面観測、流星観測などが一般的である。しかし、これらの活動では観察にとどまり、新たな知見を得て天文学に貢献することは難しい。

また、高校生の天文活動支援として「高校生天体観測ネットワーク (Astro-HS)」<sup>1)</sup>があるが、今年度は解散することが決まっており、活動は行われていない。

### (2) 宮崎北高校科学部地学班

令和2年度現在、宮崎北高校科学部には40名が在籍し、そのうち7名が地学班として天体の研究を行っている。

彼らは定期的な星空観望会や、流星観測、太陽観測なども行っている。現在は2年生4名が星食を主な研究テーマとして取り組

んでいる (図1)。

### (3) 高校生による天文学への貢献

以上のことから本研究の目的は、高等学校の探究活動で星食観測を取り扱い、正確な観測結果を取得・報告させ学術的にも満足できる活動を開発することである。

また、自作の機材による観測と、自作プログラムによる光度解析を行うことにより天文学への理解を深める。

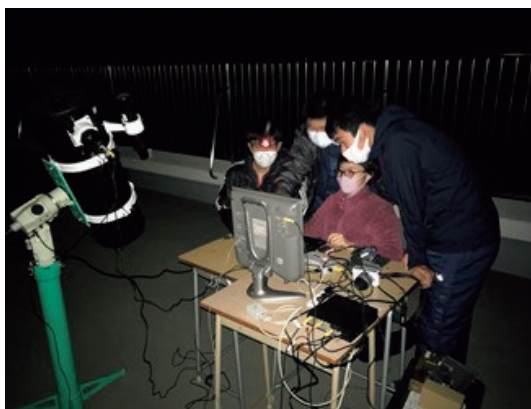


図1 星食観測を行う生徒  
観測場所は宮崎北高校屋上である。

## 2. 観測方法

### (1) 星食とは

星食とは小惑星や月などによって恒星が隠される現象である (図2)。掩蔽 (えんぺい) ともいう。日食も掩蔽現象のひとつである。一般的には月による恒星の掩蔽を「星食」と表現する。小惑星による恒星の掩蔽は「小惑星による恒星食」と表現する。

星食を観測することにより、小惑星や月の正確な形状や、背景の恒星までの正確な

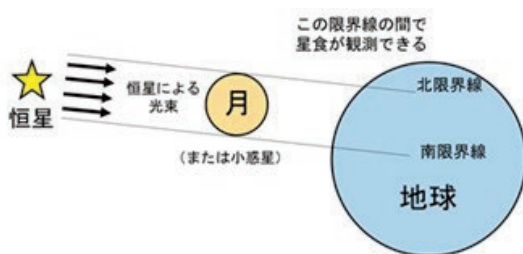


図2 星食の概要図

地球に投影された月影の中(限界線の間)で星食が観測できる。

距離を把握することができる(「星食ハンドブック2020」)<sup>2)</sup>。現在の天体の基準座標を与えているヒッパルコス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)<sup>3)</sup> が世界中から観測データを集めて補正を行っている。

日本でも星食観測日本地域コーディネーター JCLO (Japanese regional Coordinator of Lunar Occultation observation) や掩蔽観測者でつくるネットワーク JOIN (Japan Occultation Information Network) が掩蔽情報を集めている。

## (2) 星食情報の取得

星食の情報は「天文ガイド」<sup>4)</sup> や「天文年鑑」<sup>5)</sup> (いずれも誠文堂新光社) などの書籍や、掩蔽観測ネットワーク JOIN の方が運営する星食情報サイト<sup>6)</sup>、「Occult Watcher」などの星食予報ソフトを使用する。いずれも掩蔽される恒星の光度、減光量、減光時間や、小惑星の影となる地域の情報や発生時刻が示されている(図3)。

## (3) 観測機器

星食の正確な観測時刻を記録するためにビデオ観測を採用する。天体の導入反射式望遠鏡(ニュートン式、口径200mm、焦点距離800mm)と赤道儀タカハシEM-10に高感度CCDカメラWAT-910HX/RCを取り付けて行う。正確な時刻はGPS時計とビデオタ

| 小惑星名                 | 観測日・時刻        | Magn. | Rank | Travel Dist. | 最終更新          |
|----------------------|---------------|-------|------|--------------|---------------|
| (4751) Roma          | 日 30 日, 02:45 | 11.0  | 95   | 64 km 北西     | 16 日, 08:35 * |
| (1300) Rhoda         | 日 30 日, 09:12 | 11.7  | 100  | 109 km 南     | 16 日, 09:29 * |
| (1640) Desdemona     | 月 31 日, 03:40 | 6.0   | 71   | 187 km 北     | 16 日, 09:38 * |
| (1577) Dehamela      | 金 04 日, 09:52 | 6.0   | 67   | 89 km 南      | 16 日, 09:40 * |
| (1740) Theosopos     | 金 04 日, 17:24 | 11.0  | 100  | 14 km 北      | 16 日, 09:41 * |
| (91) Eros            | 月 07 日, 02:37 | 8.1   | 100  | 143 km 北     | 16 日, 09:40 * |
| (1215) Oenone        | 金 11 日, 02:25 | 10.5  | 94   | 55 km 北西     | 16 日, 09:41 * |
| (111) Parthenope     | 金 18 日, 00:09 | 9.9   | 100  | 83 km 南東     | 16 日, 09:42 * |
| (640) Idunn          | 土 19 日, 02:41 | 11.1  | 100  | 107 km 南     | 16 日, 09:42 * |
| (1544) Eos           | 火 22 日, 20:49 | 11.2  | 95   | 49 km 南東     | 16 日, 09:43 * |
| (150) Eulencia 41 ** | 土 24 日, 09:57 | 11.3  | 100  | 1102 km 南    | 16 日, 09:43 * |
| (1212) Nereus **     | 金 10 日, 00:39 | 7.0   | 24   | 129 km 東     | 16 日, 09:44 * |
| (15820) 1994 TB      | 金 18 日, 02:25 | 14.2  | 1    | 5105 km 南    | 16 日, 09:44 * |

図3 Occult Watcher

星食情報が自動更新で配信される。限界線などの情報も充実している。

タイムインポザーの機能が一体となったGPS-COROを通してビデオ映像に記録する。ビデオ映像はソフトウェアエンコード式のビデオキャプチャ装置PC-SDVD/U2Gを用いてパソコンに保存する。キャプチャソフトは、星食観測専用ソフトLimovieのキャプチャ機能を使用する(図4)。観測場所は宮崎県立宮崎北高校屋上である(東経131度26分6.3秒、北緯31度58分14.6秒)。なお、観測できる視野角は約0.5度と目視

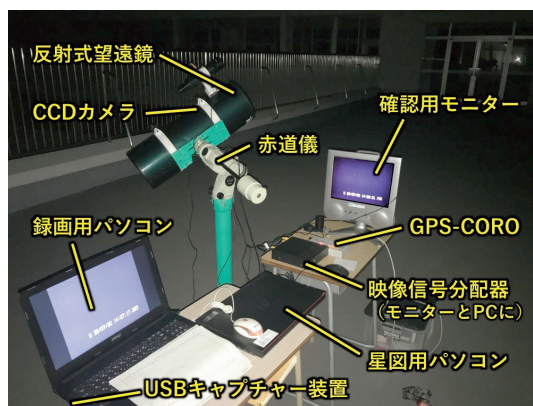


図4 観測装置

望遠鏡に取り付けたCCDカメラの映像は、GPS-COROを経由して時刻情報が付与される。映像信号分配器を通して確認用モニターとUSBキャプチャ装置に映像を送る。USBキャプチャ装置に送られた映像は、記録用パソコンで録画する。

できない狭さなので、星図を元に明るい星を辿りながら目的の恒星を導入する。

#### (4) 解析ソフト

星食観測専用ソフトLimovieを用いる。Limovieは星食を記録したビデオを測定し、天体の様々な情報を得るために開発されたソフトである。今回は動画キャプチャの他、恒星の測光と光度曲線の作成に用いている(図5)。

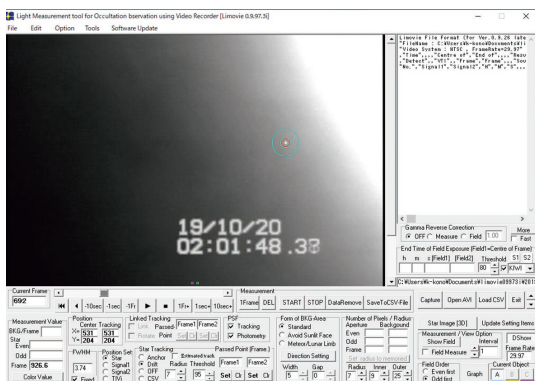


図5 Limovieの解析画面

画面中心の二重丸が測光領域である。星像エリアからバックグラウンドエリアのカウント数を減算し、星だけの明るさを検出する。動画解析が可能で、星像の時間変化をグラフ化できる。

### 3. 生徒による観測と解析

#### (1) 観測結果

生徒はこれまで(表1)に示す星食観測を行ってきた。

|                    |           |      |
|--------------------|-----------|------|
| 2019年10月20日 17時01分 | 月による恒星食   | 暗縁出現 |
| 2019年12月15日 19時56分 | 月による恒星食   | 暗縁出現 |
| 2020年1月3日 12時04分   | 小惑星による恒星食 | 減光無し |

表1 生徒による観測(世界時間)

この中で現象を撮影できたのは2019年10月20日17時01分(世界時間)に観測したふたご座の恒星SAO78135の月による恒星食であった。これは月の暗縁から恒星が出現する現象であった(図6)。当日は薄曇りで動画にも雲が流れており、好条件ではな



図6 恒星SAO78135の出現

右上の白い部分は月明かりである。上の画像では恒星は月に隠れているが、下の画像では暗縁から出現した。

かった。

なお、この時の高感度CCDカメラはWAT-100Nを使用している。

#### (2) 解析結果

現象の光度曲線を作成したところ、2段階の増光が見られた(図7)。SAO78135は二重星であることが知られている。撮影した動画には雲が多く、この光度変化が雲によるものか、二重星の出現によるものか検証した。

フレーム数が多いため、30fpsで記録されている動画を10fpsにビンニングし、検定する数値の平均からのずれを標本全体の標準偏差で割った値の大きさを二重星の出現を検定した。この値を基準値とよぶ。1つめの星の出現は基準値が5σを超えた点だ

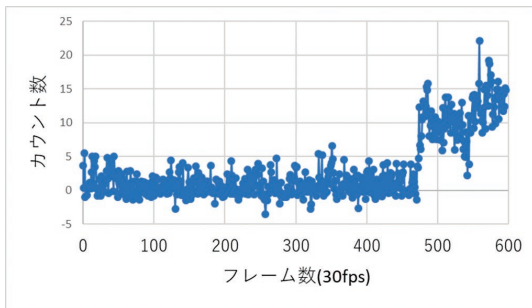


図7 恒星出現を示す高度曲線

縦軸はカウント数、横軸はフレーム数(30fps)である。測光を始めて460フレームあたりから増光が見られる。

と定めた。増光後は明るさの変化が激しいため移動平均を取り、1つめの星が出現した後のフレーム中で1 $\sigma$ を超えた部分を2つめの星の出現と定めた(図8)。

以上より、2段階増光があったと判断した。解析の結果、二重星の出現間隔は3.00 $\pm$ 0.10秒となった。

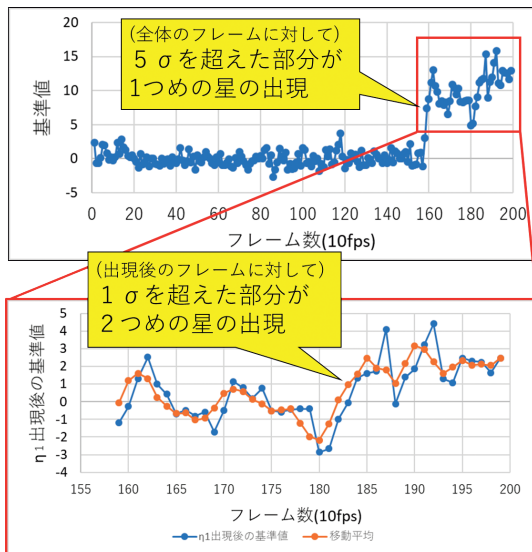


図8 二重星の出現を示す基準値

縦軸は各点のカウント数の平均からのずれを標本全体の標準偏差で割った値である。基準値とよぶ。横軸はビンニング後のフレーム(10fps)である。下の画像は $\eta_1$ 出現後を拡大し、基準値を取り直したものである。移動平均グラフより、明確な2段階増光があると判断した。

### (3) 考察

二重星の出現間隔を計算によって求め、解析結果が正しいか検討する。ここでは便宜上先に出現した星を $\eta_1$ 、後に出現した星を $\eta_2$ とする。

まず球面上の座標をもとに、月が $\eta_1$ と $\eta_2$ を通過する見かけの距離を求める。Aを $\eta_1$ 、Bを $\eta_2$ 、Cを北極星とおき、斜角球面三角形ABCを作り、余弦定理よりAB間の角距離cを求める(図9)。

Aの赤経は6h14m52.695s、赤緯は22° 30' 24.56"である。Bの赤経は6h14m52.569s、赤緯は22° 30' 24.31"である。ここで、

$$a = 90^\circ - \text{Bの赤緯}$$

$$b = 90^\circ - \text{Aの赤緯}$$

$$\theta = \text{Aの赤経} - \text{Bの赤経}$$

とおく。これを余弦定理

$$\cos c = \cos a \times \cos b + \sin a \times \sin b \times \cos \theta$$

に代入し、角距離cを求める。

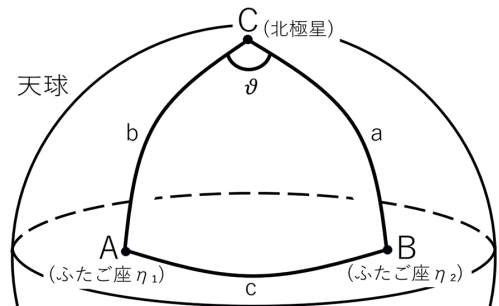


図9 斜角球面三角形

天球上に三角形ABCを描く。AとBが二重星である。角度 $\theta$ は実際よりもかなり大きく表現している。

角距離cから、二重星の見かけの距離を求める。

$$\tan \frac{c}{2} = \frac{x}{\text{測心距離}} \cdots (1)$$

式(1)で求めたxの2倍が二重星間の見かけの距離である(図10)。



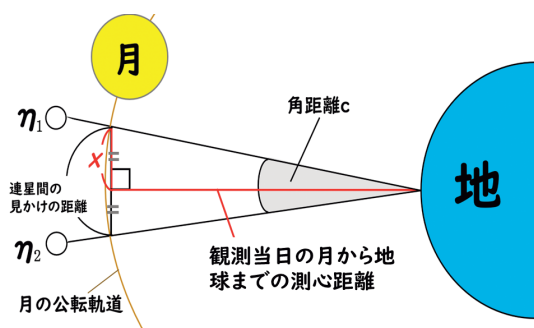


図10 二重星間の見かけの距離

上記で $x$ を求めれば、その2倍が月の移動していく距離となる。

二重星間の見かけの距離を月の平均公転速度で割ることによって連星の出現時間の差が算出できる。その結果、3.16秒となった。

しかし、月は地球の周りを楕円軌道で公転しているので公転速度が一定ではない。よって観測当日の月の公転速度を求めるため、作図により $\theta$ を求める。実際の値を縮尺したものを模造紙に作図して求めたところ $\theta = 87.3$ となった（図11）。

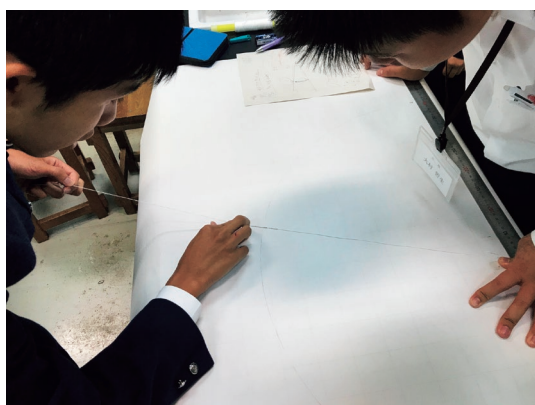


図11 模造紙に楕円軌道を描く生徒

ひもを用いて正確に楕円軌道を描き、天文シミュレーションソフトで調べた月と地球の距離を書き込んでいく。

次に力学的エネルギー保存の法則とケプラーの第2法則を用いて当日の月の公転速度を求める（図12）。

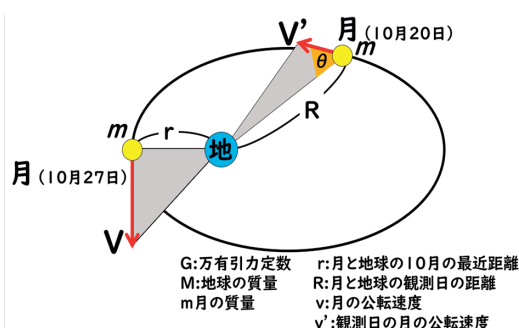


図12 楕円軌道の月面速度

天文シミュレーションソフトから月と地球の距離を調べ、速度を計算した。

力学的エネルギー保存の法則

$$\frac{1}{2}mv^2 + \left(-G\frac{Mm}{r}\right) = \frac{1}{2}mv'^2 + \left(-G\frac{Mm}{R}\right)$$

と、ケプラーの第二法則

$$\frac{1}{2}rv = \frac{1}{2}Rv' \sin \theta$$

より、当日の月の公転速度は

$$v' = 1014.6 \text{ m/s}$$

となった。式（1）で求めた見かけの距離を $v'$ で割ると、二重星の出現間隔は3.19秒となった。これは概ね解析結果と一致しており、曇天の中でも正確に観測できたと考える。

#### 4. 生徒による自作装置

##### (1) Arduinoを用いたGPS時計

星食観測を全国に広めるためには、高価な機材を揃えることがハードルとなっている。そこで、まずは正確な時刻を刻むGPS時計を自作し、その方法を公開することで星食観測の輪を広げようと考えた。

GPS時計の制作にはArduinoを用いた。準天頂衛星みちびきの信号を受信できるGNSS (GPS・GLONASS・QZSS) 受信機キットと併せて5,000円程度で制作できた（図13）。

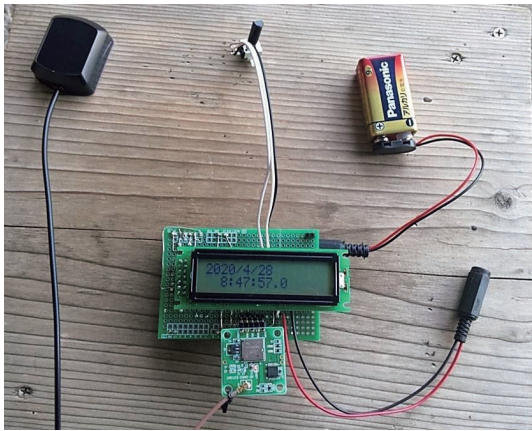


図13 生徒による自作GPS時計

Arduinoを用いて制作している。写真左上は衛星との通信アンテナ。

この 1 pps信号の点滅を、光ファイバーを通して望遠鏡の先端へ写し込めば、簡易的に正確な時刻を動画に記録することができる。

## (2) 自作プログラミングによる測光

曇天時の観測映像や、明るい月縁から星が出現するような場合には、Limovieでは正確に測光することが難しい。また既存の測光ソフトだけを使用しては、具体的な測光方法がブラックボックスとなってしまう。

そこで、生徒はプログラミングによりオリジナルの測光プログラムを作成し、自由度の高い測光を試みている。

現在、すでに恒星の出現を示す光度曲線は作ることができる(図14)。現在は測光する天体の追尾機能をプログラムしている。

## 5. 指導者による観測と解析

### (1) 観測結果

今回は世界時間2020年 7 月30日14時25分43秒の発生を予報された小惑星による恒星食(表2)を観測した。なお、恒星のおおよその場所は(図15)に示す通りである。

撮影した動画には恒星の減光が見られた(図16)。

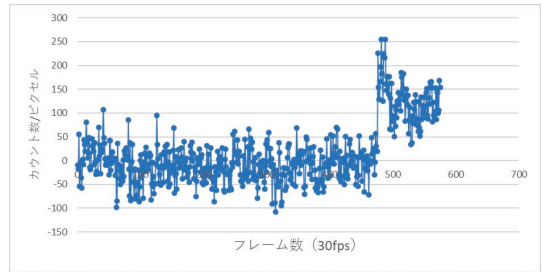


図14 自作プログラムで求めた光度

縦軸は1ピクセルあたりのカウント数、横軸はフレーム数。星の出現を捉えている。

|        |                          |
|--------|--------------------------|
| 予報時刻   | 2020年7月30日 14h25m43s(UT) |
| 恒星     | UCAC4 324-180975         |
| 等級     | 12.41等                   |
| 小惑星    | (111)Ate                 |
| 等級     | 12.38等                   |
| 直径     | 139.0km                  |
| 減光量    | 0.8等                     |
| 最大継続時間 | 14.4秒                    |
| 掩蔽帯    | 九州                       |

表2 Occult Watcherによる食の予報

### (2) 解析結果

撮影した動画をLimovieで測光したところ、光度曲線に明らかな減光が確認された(図17)。

この光度曲線から、減光開始時刻は14時25分44.4秒、減光終了の時刻は14時25分57.4秒となり、約13秒の減光が観測された。

今回の結果は、掩蔽観測者ネットワーク JOIN (Japan Occultation Information Network) へと報告した。

### (3) 考察

光度曲線の形に二段階の減光が見られるため、未知の二重星の発見も考えられた。もしそうであれば国内5例目となる大発見である。

しかし、JOINのメンバーによって減光前の光度曲線の周期的な変化が3 DNR (3次元ノイズリダクション) 機能を使用した影

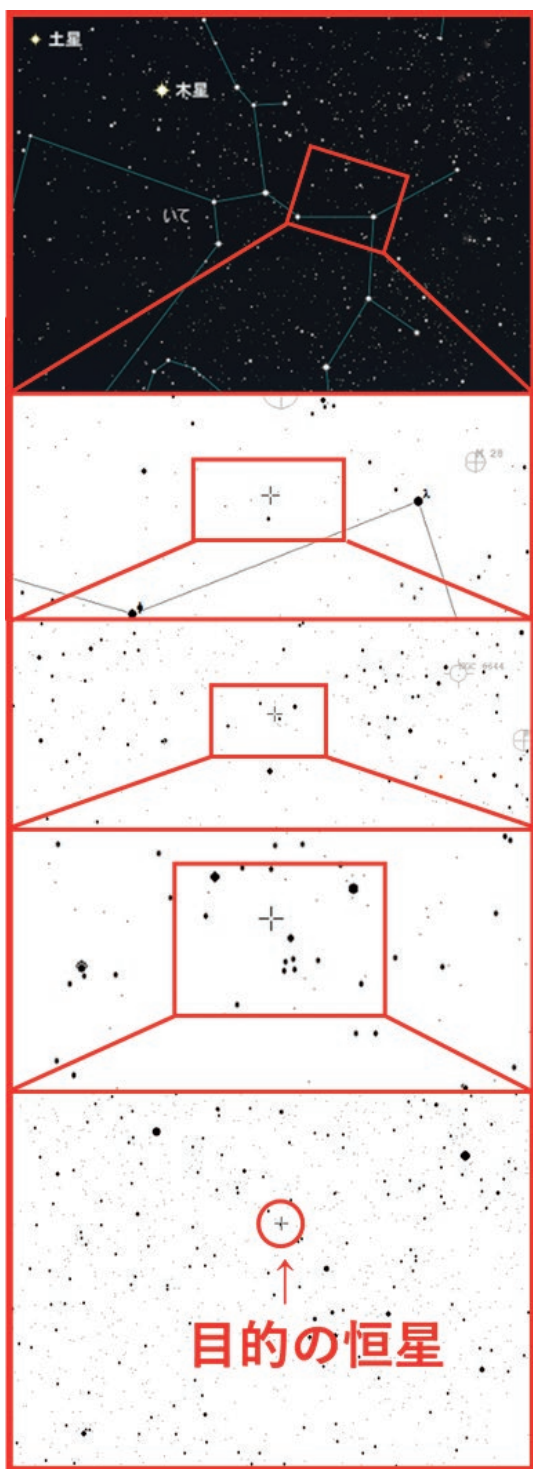


図15 恒星UCAC4324-180975の位置  
いて座の一部に位置する。最も下の図は約0.5度の視野角を表示している。モニターに映る範囲と同じである。



図16 減光前(上)と減光中(下)  
減光する恒星UCAC4324-180975。時報はGPS-COR0によって挿入された世界時間。

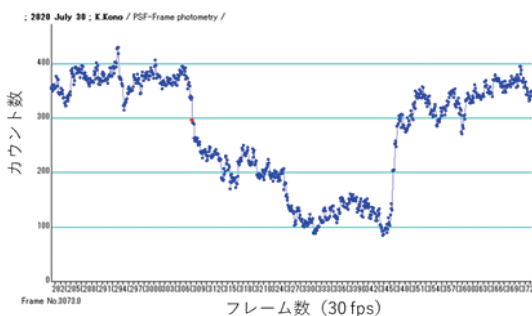


図17 減光を示す高度曲線  
縦軸は天体の明るさを示すカウント数、横軸は動画の1/30秒ごとのフレームである。

響の可能性が指摘された。3 DNRは今回使用したCCDカメラ (WAT-910HX) に搭載されている機能である。ノイズを低減して

動画を見やすくする反面、周期的な光度変化が起きるため、星食観測では使用すべきでは無い (Tony George et al. 2020)<sup>7)</sup>。

よって、減光は確実に二重星の発見については結論が出ないままとなった。

また、報告した観測結果をもとにJOINの広瀬敏夫氏によって、観測結果の整約図が公開された (図18)。予報では小惑星の直径は139kmであったが、観測結果より146kmの円が描けた。これは、小惑星のいびつな形状に関係すると考えられる。複数箇所の観測結果があれば、小惑星の形状を特定することも可能である。そのために、全国の高校生に星食観測の輪を広げたいと考えている。

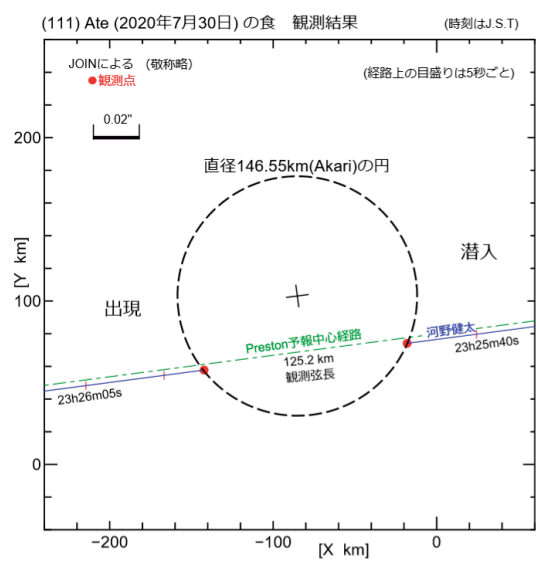


図18 広瀬敏夫氏(JOIN)による整約図  
観測結果をもとに恒星を隠す小惑星の大きさを示している。観測数が多ければ、より正確な形状が判明する。

#### (4) 生徒による観測との比較

今回は小惑星による恒星食を観測した。月による恒星食と比較して、対象星を見つけることが格段に難しくなる。経験と慣れが必要だが、今回はモニターと天文シミュレーションソフトを見比べながら時間をか

けて導入している。生徒でも十分に行うことができる。

生徒が観測する際は高感度CCDカメラの設定に注意する必要がある。先に述べた3DNR機能やゲイン調整などを行うと、光度解析に支障をきたすためである。微光星を導入する際も、露出時間の変更にとどめておく必要がある。

また、観測から報告までの期間もできるだけ短くすべきである。今回は観測翌日にはJOINへ報告したが、生徒の場合は解析に数日を要することがある。

なお、今回の観測結果は「天文ガイド」や「天文年鑑2021」などに掲載される予定である。

## 6. 天文学への貢献

星食の研究が生徒の意識にどう関係しているかアンケート調査を行った。

アンケートはGoogle Formを利用し、これまで他校で指導してきた卒業生も含めて17名を調査した。内訳は、卒業生10名、高校2年生4名、高校1年生3名である。研究内容の内訳は、星食研究4名、日食現象3名、太陽に関する研究1名、流星に関する研究9名である。

入学前生徒の天文学への興味はばらつきが多かった (図19)。しかし、研究を重ねることで天文学への興味が増していることがわかる (図20)。星食の研究についても、その変化が顕著である。

天文学の研究は、パソコンでデータ処理をする時間が長く、生徒には苦痛では無いかと予想していたが、現役生も含めて研究を楽しんでいた (図21)。

研究を通して天文以外でも「未知のことに挑戦しよう」という意識を持ったか調査した結果、大部分の生徒が主体性を持っていた (図22)。特に星食研究ではその比率



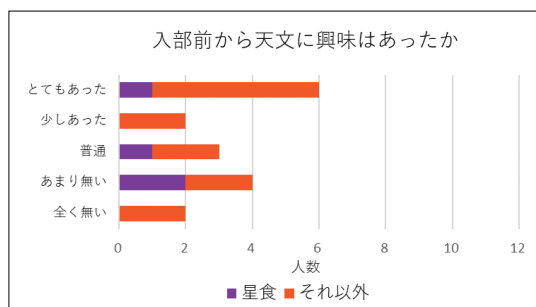


図19 入学前の天文学への興味

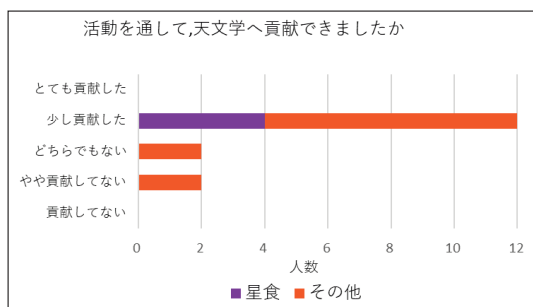


図23 天文学へ貢献できたと思うか

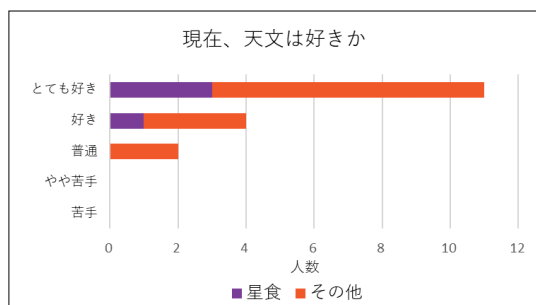


図20 部活動経験後の天文学への興味

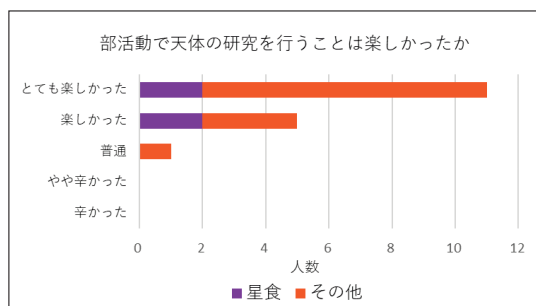


図21 天体の研究は楽しかったか

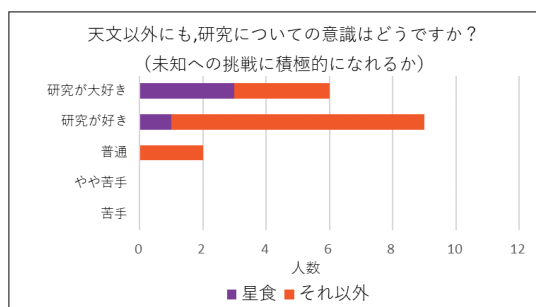


図22 研究の意識は変化したか

が高かった。

天文学への貢献度意識を調査した。大多数の生徒が自分たちの研究結果が天文学に少しは貢献できたと答えた（図23）。今後、星食研究を行う生徒が自信を持って「とても貢献した」といえるようにすることが本研究の目的である。

## 7. まとめと今後の展望

小惑星による恒星食は、月による星食に比べて観測が難しい。無数の天体から見つけ出した恒星が、予報時間に見事に減光した瞬間の感動は筆舌に尽くしがたいものがある。月による恒星食も、対象の星の消失や出現の様子を見ることは宇宙空間の天体の動きを実感できる。星食現象の観測は、生徒に研究の感動と満足感を与えることができると思う。

また、気象条件によっては観測できないこともあり、一期一会の観測を大切にしようとする気持ちを育成できる。これが主体的に研究を行う姿勢の涵養につながる。

今年度は新型コロナウイルス感染症流行のため、休校が相次ぎ部活動の研究時間も満足に取ることが出来なかった。研究成果を発表する大会も、多くが中止もしくはオンライン開催となり、研究者との意見交換もままならなかった。

今後は、生徒の星食観測の機会をさらに

増やし、JCLOやJOINへの報告を増やしていく。また、星食観測の輪を広げるために、自作モジュールや自作プログラムの指導も続けていきたい。

## 謝辞

本研究をまとめるにあたり、まずは助成をいただいた公益財団法人下中記念財団および関係者の方々に感謝を申し上げます。

研究におきましては、広瀬敏夫様ならびにJOINの皆様にも多くの助言をいただきました。また、宮崎大学工学部の山内誠先生、宮崎北高等学校の黒木和樹先生、長友優樹先生、菊池高弘先生にも生徒への指導助言を多くいただきました。この場を借りて、深く感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 塚田健らによるホームページ「高校生天体観測ネットワークAstro-HS」  
<https://astro-hs.sakura.ne.jp/>
- 2) 相馬充・鈴木寿・渡辺裕之・宮下和久「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
- 3) IOTAホームページ  
<http://www.lunar-occultations.com/iota/iotandx.htm>
- 4) 「天文ガイド2020年4月号～9月号」（誠文堂新光社）2020年
- 5) 「天文年鑑2020」（誠文堂新光社）2020年
- 6) 早見勉氏によるホームページ「HAL星研」  
<http://www.hal-astro-lab.com/>
- 7) Tony George et al. “Never Use 3 DNR Camera Setting” 2020

\* 広瀬敏夫・相馬充「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

\* 森岡怜生・濱川咲笑・木田真太郎・菊池慶祐「月に隠れていたのはふたご！？～月によるふたご座 $\eta$ 星の掩蔽観測～」2019年

（第3章「生徒による観測と解析」において指導した生徒たちの熱心な研究を反映し、加筆したものを掲載している）



河野 健太先生  
(この けんた)

<略歴>

1985年 大分県別府市生まれ  
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（現在まで）  
2019年 宮崎県立宮崎北高等学校 勤務  
現在に至る

<研究歴>

2015年  
「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）

<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