

投稿

手軽な機器で行う生徒による天文探求活動

～高価な機材を用いず天体の物理量を求める試み～

松本直記（慶應義塾高校）、櫻井悠貴（慶應義塾高校^{*1}）、
関家慶一郎（慶應義塾高校^{*1}）、柳澤宙輝（慶應義塾高校^{*1}）

*1：当時。現在は慶應義塾大学

1. はじめに

筆者のうち松本は、勤務校における高校3年時の選択科目において天体を主な題材とし、実際に観測を行い、その観測結果を解析して何らかの結論を得てそれを論文にまとめる取り組みを行っている[1] [2]。生徒は単独、もしくは数人のグループを作って自らテーマを決め、目的に応じた観測計画を立て、観測、解析を行う。天体の光学観測においては、本校屋上にある15cm屈折望遠鏡や30cmシュミットカセグレン望遠鏡、ガーナに設置したインターネット望遠鏡などが主に利用された。



図1 本校屋上の天体ドームと15cm屈折望遠鏡

しかし、複数のチームが限られた観測リソースを共有しているため、思うような観測が行えないことも少なくなかった。また、学校施設を利用するため、観測に伴う申請、事務手続き、引率など学校観測を行うまでの種々の業務が必要となる。

さらに2020年度は、新型コロナウイルス感染対策のため、年度前半はほぼ登校することなく授業が進められた。9月以降は短縮授

業などを経て、ほぼ平常通りの実施形態で授業を進めることができたものの、いつ登校を制限せざるを得なくなるか、不透明な状況であった。

そこで、生徒の自宅にある機材や、学校の持つ生徒に貸し出せる機材を用いて、自宅で観測を行える題材については積極的に環境構築を促した。

7月末に前期期末試験が終わり、そこから夏休みをかけて研究テーマを各自設定することとした。9月になって授業が再開したところでヒアリングを行い、生徒の考えたテーマの実現可能性などについてアドバイスをしたり、類似したテーマについてはチームを組ませたりするなどの調整を行った。

その中に、「セファイドの変光測光観測」、「木星ガリレオ衛星による木星質量の測定」というテーマが挙がり、これらを自宅観測の題材とすることにした。

この稿では、これらの生徒による探求活動の様子を紹介する。

2. 北極星の変光測光観測

筆者のうち櫻井は、研究テーマとして、セファイドの変光測光観測を選んだ。セファイドの変光周期から絶対等級を求め、見かけの等級との差から天体までの距離を求める目的とした。

対象としては、明るいセファイドであり、天球上の位置がほとんど変化しないため観測に容易な北極星を選んだ。

使用する望遠鏡はトミーテックのBORG60ED、三脚にはVIXEN ポラリエセッ

トに附属の Velbon M-155MA とした。これらは、星空公団が販売するケース[3]にコンパクトに収められ、可搬性が非常に高い。



図 2 鏡筒、三脚などコンパクトに収められる可搬ケース

変光測光観測をするためには、一般的なデジカメの jpg 画像(8bit、256 階調)では不十分で RAW 撮影できるものが必須である。デジタル一眼カメラを用いると RAW 撮影できるものの、カメラ重量が重いため、三脚などの機材もそれに応じた強度、重量が必要となってくる。そこで、コンパクトデジカメながら RAW 撮影のできる Canon PowerShot S120 を用いて観測することとした。

カメラと望遠鏡の接続には、テレスコ工作工房[4]が販売するセレストロン 8-24mm ズームアイピースとアダプタのセットを用いた。



図 3 コンパクトデジカメ Canon PowerShot S120



図 4 ズームアイピースと接続アダプタ

観測は、2020 年 11 月 14 日から 12 月 21 日まで 23 晩、26 回行い、対象の北極星の他、比較星としておおぐま座 α 星、ふたご座 α 星、カシオペヤ座 α 星も同条件で撮影した。

撮影された画像は、星空公団作成の RAW 画像を FITS 画像に変換するソフトウェア、raw2fits[3]を用いて FITS 形式にし、画像処理ソフトウェア Makali'i[5]を用いて、ダーク処理、フラット処理の一次処理を行った上で、開口測光を行い、恒星の明るさを数値化した。

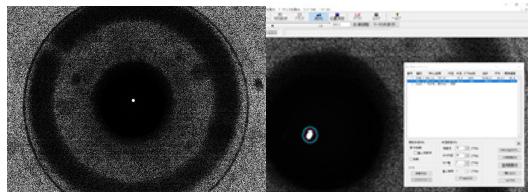


図 5 一次処理後の北極星(左)と Makali'i で開口測光を行っている様子(右)

比較星の等級は Astroarts 社のステラナビゲータで調べ、それぞれのカウント値からボグソンの式を用いて北極星の等級を求めた。26 データのうち、観測に熟練せず誤差が大きいと思われる 11/14、11/17 および目視に比べて明らかに明るい結果となった 11/29 のデータを外れ値とし、23 データで時系列グラフを作成した。

典型的なセファイドの光度変化パターンは、天文学辞典[6]から調べた。デジタルカメラの CCD 素子は R・G1・G2・B の 3 色 4 素子からなり、raw2fits で FITS 化する際には光量

が最も稼げる R・G1・G2・B の合計である L ファイルを用いたので、変光プロファイルは V バンドによるものを採用した。以下、図 6 に北極星の等級変化の時系列変化に、V バンドの変光プロファイルを変光周期を変えながら重ね、最も観測にフィットしたものを示す。

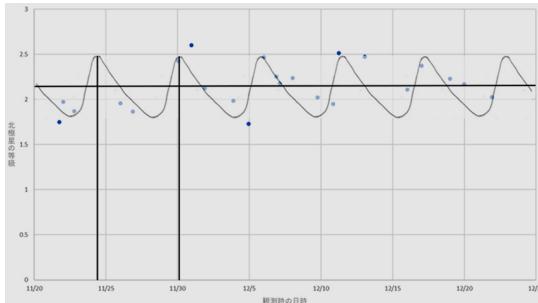


図 6 北極星の光度曲線とセファイド V バンド変光プロファイル

この結果から、変光周期は 5.58 日、実視等級は最輝等級と最暗等級の平均で 2.14 等と求まった。セファイドの性質から、変光周期より絶対等級は -3.44 と求まった。絶対等級 M と実視等級 m が求まれば、以下の式から距離 d(パーセク)を導くことができる。

$$M = m + 5 - 5 \log_{10} d$$

結果、距離は $d = 10^{2.116} = 130.6\cdots$ となり、131 パーセク (426 光年) と求まった。以下、本研究により求まった値と、文献値の比較を示す。

表 1 本研究で求まった値と文献値の比較

	求めた値	文献値	誤差率[%]
周期(日)	5.58	3.97 ^{※2}	41
視等級	2.14	2.0	7.0
絶対等級	-3.44	-3.6	4.4
距離(光年)	426	433	1.6

※2 : <http://www.sai.msu.su/gcvs/cgi-bin/search.cgi?search=alf+UMi> を参照。
その他の文献値は理科年表より。

コンパクトデジカメによる観測であったが、天体用の高価な CCD カメラなどを用いずに、天文学の科学観測を行うことができたのではないかと考える。

3. ガリレオ衛星を用いた木星質量の測定

筆者のうち、関家、柳澤はガリレオ衛星の公転周期と軌道半径を求め、ケプラーの第 3 法則を用いて木星の質量の決定をテーマとした。このテーマでは、過去にも学校天文台やガーナインターネット天文台、本校屋上のインターネット天文台を用いて研究を行った生徒チームが複数あった。過去の例はいずれも十分に準備された観測環境を利用してものであつたが、生徒による自宅での観測を可能にするため、関家は自己で所有するデジタルビデオ SONY FDR-AX100 (光学 12 倍ズーム) を、柳澤は学校より貸与されたデジタルカメラ Canon Powershot SX60HS (光学 65 倍ズーム) を用いた。これらの機材に加え、三脚と、デジタルカメラに接続するデジタルリードスを貸与した。これらを用いて、それぞれ自宅にて観測を行った。



図 7 関家が用いたデジタルビデオ SONY FDR-AX100 と学校から貸与された三脚



図 8 柳澤がデジタルカメラ Canon Powershot SX60HS を用いて自宅から観測をしている様子

関家は2020年10月13日から11月18日まで、自宅近くの公園と自宅で9晩の観測を行った。柳澤は10月13日から11月22日まで自宅で12晩の観測を行った。



図9 デジタルビデオで撮影した木星と衛星
ズーム：最大倍率（光学ズーム12倍）、デジタルズームはオフ、撮影モード：静止画モード、シャッタースピード：1/8秒、F値：4.0、ISO感度：12800、10月24日19:00撮影。白枠内は木星と衛星を拡大したもの。



図10 デジタルカメラで撮影した木星と衛星
ズーム：最大倍率（光学ズーム65倍）、デジタルズームはオフ、焦点：無限遠、シャッタースピード：1秒、F値：6.3、ISO感度：800、10月24日18時32分撮影。

次に、撮影画像の画角を調べるために、ウォーキングメジャーで80mを測り、その位置に、カメラからの角度が 1° になるように、1.39m離してペットボトルとウォーキングメジャーを置きそれぞれ、デジタルビデオとデジカメで撮影した（図11）。Makali'iで両者の距離をピクセル単位で測定し、画像上で 1° 当たりのピクセル数を求めた。同様に観測画像においてMakali'iを用いて、木星の中心から各衛星に対しての距離をピクセル単位で測

定し（図12）、その値から角距離 θ （分角単位）を求め、衛星の動きの時系列変化を調べた。

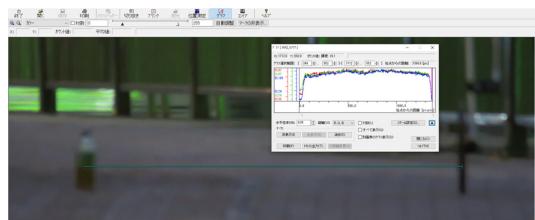


図11 画像の画角解析

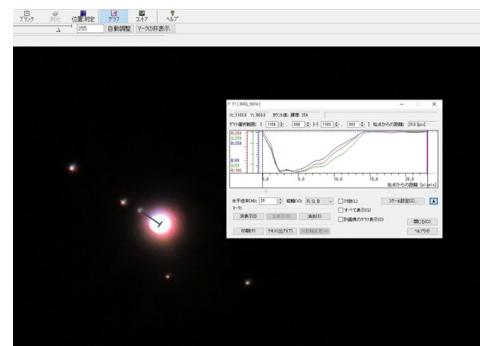


図12 衛星と木星中心の距離をMakali'iで測定する

衛星は、木星の周りを公転している。地球からこれをほぼ真横から見る形になるので、衛星の位置変化はサインカーブを描くよう見える。このサインカーブの周期が公転周期、振幅が軌道半径となる。

正確に周期と振幅を読み取るため、観測結果にサインカーブを重ねて描き、それぞれの観測結果と同時刻のサインカーブの示す値の差の総和が最小となるような、パラメータを見いだした（図13～15）。

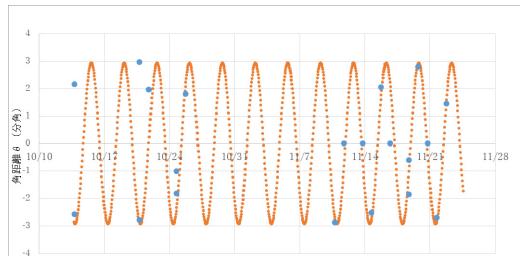


図13 エウロパの動き

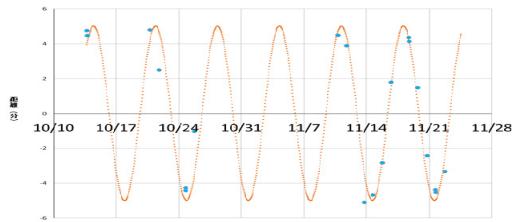


図 14 ガニメデの動き

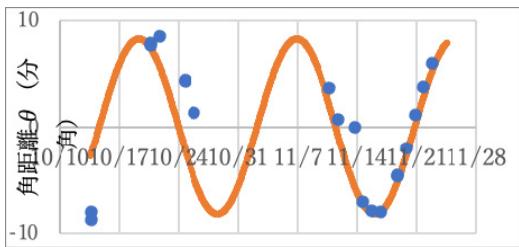


図 15 カリストの動き

なお、イオは木星に近く、デジタルビデオでの観測では木星と分離できないこともあります、解析可能数が少ないことから、解析対象から外した。

以下に、観測結果と周期振幅解析により求めた 3 衛星の公転周期[日]と軌道半径[m]を示す。軌道半径については、この時期の木星-地球距離 (5.426au) をステラナビゲーターで調べ、その値と振幅から求めた。

表 2 解析による衛星の公転周期と軌道半径

衛星	公転周期 [日]	振幅[分角]	軌道半径 [m]
エウロパ	3.5	2.91	6.9×10^8
ガニメデ	6.9	5.00	1.2×10^9
カリスト	18.5	8.24	1.9×10^9

衛星の軌道半径 a [m]、公転周期を P [s] とすると、惑星の質量 M [kg] は以下の式で導かれる (G は万有引力定数)。

$$M = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2}$$

表 2 の公転周期を秒単位に変換し、式に代入すると、それぞれの衛星のデータから木星の質量を導くことができる。計算結果を以下に示す。

表 3 木星質量の解析結果

木星質量
エウロパ $2.1 \times 10^{27} [\text{kg}]$
ガニメデ $2.7 \times 10^{27} [\text{kg}]$
カリスト $1.7 \times 10^{27} [\text{kg}]$
平均 $2.2 \times 10^{27} [\text{kg}]$
(文献値 $1.899 \times 10^{27} [\text{kg}]$)

求まった木星の質量の平均値で文献値と比較すると、誤差率は 15% であった。家庭用のデジタルビデオやデジタルカメラを使った観測は、学校天文台やインターネット天文台を用いた観測よりは、個々の精度は低いかもしれません。しかし、手軽な機材で研究を行うことで観測機会が多く確保でき、各観測の精度の低さをカバーして、有り余る観測環境を確保できたのではないだろうか。

4. おわりに

天体を対象とした科学観測には、高価な機材が必要という先入観がある。本実践において、安価で個人が購入できるような機材でも科学観測が行えることを、変光測光観測と天体の位置変化を題材として示した。このことは、自宅での継続的な観測機会を確保することに繋がり、生徒による探求活動の可能性を広げることに寄与するだろう。

以下、変光測光観測を行った生徒の感想を示す。

「研究に取り掛かる前は、誰もが手軽に扱えるデジタルカメラで本当に精度の高い結果を導き出すことができるのか不安だったが、実際に観測してみると本来の数値に近いものを求めることができ驚いた。」

小さく見た目は貧弱なコンパクトデジカメ

で研究活動を進めることになった時の不安感が伺える。明るい天体が対象であれば、十分に変光測光観測が行えることを示すことができた。

次に木星の質量を求めた生徒の感想を示す。

「研究は正直大変だった。この研究には観測データが大量に必要だったが、天気の悪い日が多く、なかなか観測ができない期間が続き、もどかしかった。また冬の観測では、寒い中で雲の切れ目を狙って何時間も観測を続けていたので、大変だった。データの解析も数が多く、時間がかかってしまった。しかし、それゆえかなり正確な質量が出た時の達成感は、非常に大きかった。また、初めて観測した時、コンパクトデジカメでこれまでのものが撮れるのかと、感動したのを覚えている。」

貸与したデジカメは拡大撮影に特化したもので、この研究テーマにおいては十分な性能を持っていました。接続する望遠鏡など他の光学環境は不要であるので手軽に観測を行う環境は提供できたと考える。そこから観測をして結論を得るために地道な継続が必要である。継続観測は大変ながらも精度のよい結論が導かれ、大きな達成感を得られたことが述べられている。まさに科学の醍醐味を味わうことができたと言えよう。

「天気に苦労した。天体観測全般に言えることではあるが、夜に時間が確保できる日数が限られていたので、撮影できる日に雨が降ったり曇っていたりすると、データを集め際に撮影日がまばらになってしまった。」

木星をデジタルビデオで観測した生徒の感想である。学校天文台を観測予約して研究を進めるより遙かに観測機会に恵まれているはずなのに、このような感想を抱くのは、より時間分解能が高く質の良い観測をしたいという意識が高まったと捉えることもできよう。この研究で用いたデジタルビデオは光学倍率12倍のものであった。昨今は安価なものでも

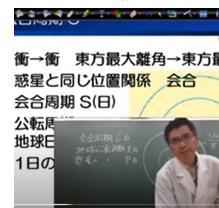
40倍、50倍といった高倍率光学ズーム搭載の機種も多くあり、月のクレーターなどは簡単に撮影することができる。家庭用デジタルビデオを用いた天文探求活動にはもっと可能性があるのではないかと感じている。

デジタル撮影機器の高性能化と安価化によって家庭用機材を用いた「お手軽天文探求活動」が行える環境が整ってきた。この実践例が天文分野において、自然から得たデータから結論を導き出すという、科学の醍醐味を味わう機会を増すことになれば幸甚である。

文 献

- [1] 松本直記 (2004)『こんな授業やってます(2)舞台で生徒は大きくなる』, 天文教育 **16(6)**, pp.43-49
- [2] 松本直記 (2012)『高校生によるトランジット観測(慶應高校編)』, 天文月報, **105(2)**, pp.82-86
- [3] 星空公団ホームページ
<https://www.kodan.jp/>
- [4] テレスコ工作工房
<https://telesco-factory.ocnk.net/>
- [5] すばる画像解析ソフト – Makalii – 配布サイト
<https://makalii.mtk.nao.ac.jp/>
- [6] 天文学辞典 <http://astro-dic.jp/>

本研究の一部に慶應義塾学事振興資金の助成を受けました。ここに謝意を申し上げます。



松本直記