

短周期食連星の測光観測

佐々井祐二*, 岸部仁美**, 大嶋真以**

Photometric Observation of Short-Period Eclipsing Binary Star

Yuji SASAI, Hitomi KISHIBE and Mai OSHIMA

The apparent luminosity of the eclipsing binary star changes periodically, which consists of two stars hidden by each other. We took a series of pictures of the short-period V1191 Cyg using the 50cm-diameter telescope of Bisei Spaceguard Center on August 6th, 2013, and also took a series of pictures of the short-period V0523 Cas using the 101cm-diameter telescope of Bisei Astronomical Observatory on October 12th, 2013. We then reduced the data and performed a photometric analysis using image reduction and analysis facility (IRAF) software. We estimated the periods of luminosity variation by drawing the light curves. We also summarized the procedure of the image reduction and the photometric analysis using IRAF.

Key Words : Eclipsing Binary Star, Photometric Observation, IRAF

1. 緒 言

変光星は時間とともに明るさが変化する恒星である。変光星の種類には大きく分けると、連星が互いに隠し合いをする食現象が起こり見かけの明るさが変化する食変光星¹⁾(食連星)、恒星自身が周期的に膨張・収縮を繰り返すことで明るさが変化する脈動星、急激な光度変化を見せる爆発変光星とに分けることができる。この中でも、特に食連星は測光観測と分光観測の結果の分析により、星の質量、半径、光度、温度などの物理量を決定することができるので、天体物理学上たいへん重要である。

本取組では、2013年8月6日に美星スペースガードセンターの口径50cm望遠鏡ではくちょう座V1191を撮影し、2013年10月12日に美星天文台の口径101cm望遠鏡でカシオペア座V0523²⁾を撮影した。この撮影画像を測光解析し、光度曲線を求めることにより各食連星の公転周期と大小関係を推定する。これらの食連星については天文学者により研究されていることではあるが、解析例も多いわけではなく、本取組はデータ蓄積の意味もある。また、天文学者が使用しているCygwin環境上のIRAFでデータ解析を行った。IRAF^{3), 4)}はアメリカ国立光学天文台のプログラマーによって書

かれたソフトウェアの集合体である。このソフトウェアにより、CCDカメラなどの検出器により得られたピクセル配列フォームの天体画像データを解析することができる。しかし、測光解析にも分光解析にも利用できる反面、使用方法の敷居が高く、それぞれの用途で使用するためには入念な調査が必要である。本稿ではIRAFを用いるデータ整約(ノイズを取り除く画像処理)と連続測光についてもまとめた。

2. 観測方法

V1191 Cyg に対しては、8月6日(火)の22:00～翌4:00の間に、露出時間30秒と60秒、70秒で計277枚撮影した。大気の状態変化に合わせて露出時間を変更している。この時使用した観測機器は、美星スペースガードセンターの50cm望遠鏡(図



図1 美星スペースガードセンター50cm望遠鏡(HPより引用)



図2 美星天文台101cm望遠鏡

原稿受付 平成26年9月1日

*専門学科共通科目 sasai@tsuyama-ct.ac.jp

*情報工学科4年生

1), CCD カメラは画素数 2048×2048 pixel で視野 100 分×100 分, フィルターは Wi (5880-9380 Å) である.

V0523 Cas に対しては, 10 月 12 日(土)の 23:00 ~翌 5:00 の間に, 露出時間 40 秒と 60 秒で計 239 枚撮影した. この時使用した観測機器は, 美星天文台 101cm 望遠鏡 (図 2), CCD カメラは画素数 1024×1024 pixel で視野 6.8 分×6.8 分, フィルターは R (1380-6380 Å)である.

3. データ解析

変光星の光度変化を調べるためには, 光度変化しない比較星が必要である. V1191 Cyg については HD228695(A0), V0523 Cas については USNO-A2.0 1350-00691230 を使用した. 以下の手順でデータを解析した.

- ① IRAF を用いてオブジェクト (天体) 画像からダーク (暗電流によるノイズ) とバイアス (読み出しノイズ) を引き, フラットで割る. ダークとバイアスを引くことによってオブジェクト画像のノイズを減らし, フラット画像で割ることによりオブジェクト画像の周辺減光を補正することができる.
- ② IRAF 上で整約済みの各画像の変光星と比較星の画像上の位置情報を取得し, パラメータを設定の上, 連続測光を行う.
- ③ 変光星と比較星のフラックス (輝度) を測定し, 次のポグソンの式を用い Excel 上で等級差を求める.

$$\Delta m = 2.5 \times \log_{10} \frac{L_1}{L_2}$$

ここで, Δm は比較星に対する等級差, L_1 は比較星のフラックス, L_2 は変光星のフラックスである.

- ④ Excel 上で測光データをグラフ化することで光度曲線が得られる.

3-1. 1 次処理

上記①の作業を 1 次処理といい, 処理後の画像を整約済画像という. 変光星 V0523 Cas と比較星 USNO-A2.0 1350-00691230 IRAF について, 上の作業を具体的に見ていく (図 3). なお, 「ecl>」は IRAF のプロンプト, 「\$」は kterm のプロンプトである. 内部コマンドの種類によっては, kterm 上で作業することもある. また, ファイルリストの内容はサンプル的に掲載する.

(1) ファイルリスト作成

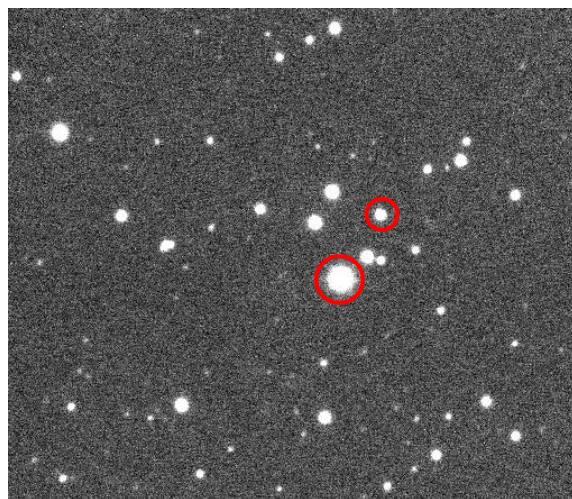


図3 変光星 V0523 Cas (下の○内) と比較星 USNO-A2.0 1350-00691230 (上の○内)

作業のために以下のファイルリストを作成する.

dark10sec.list : 露光 10 秒のダークファイル

内容 dark10s_001.fit
dark10s_002.fit
dark10s_003.fit
dark10s_004.fit
dark10s_005.fit

dark40sec.list : 露光 40 秒のダークファイル

dark60sec.list : 露光 60 秒のダークファイル

flat.list : フラットファイル

内容 flat_001.fit
.....
flat_010.fit

(2) 統計量調査

画像に宇宙線などが写り込み, 不都合な画像となっていることがある. ピクセル数, カウントの平均値, 標準偏差, 最小値, 最大値を調べる「imstat」コマンドを用いると, その異常に気がつき易い. 10 秒露光のダークファイル 5 個を調べると以下ようになった.

```
ecl> imstat @dark10sec.list
#IMAGE NPIX MEAN STDDEV MIN MAX
dark10s_001.fit 1048576 1900. 15.6 1849. 9042.
dark10s_002.fit 1048576 1901. 15.63 1848. 9376.
dark10s_003.fit 1048576 1901. 15.28 1852. 9243.
dark10s_004.fit 1048576 1901. 15.32 1856. 9102.
dark10s_005.fit 1048576 1901. 14.99 1852. 9262.
40 秒露光のダークファイル 6 個, 60 秒露光のダークファイル 5 個に異常がないかチェックする.
ecl> imstat @dark40sec.list
ecl> imstat @dark60sec.list
```

(3) フラット画像処理

フラット画像の補正用ダーク画像を合成する.

フラット画像は 10 秒露光なので、同じ露光時間のダークファイルを合成してファイル dark10sec.fit を得る。

```
ecl> imcombine @dark10sec.list dark10sec.fit combine=median
```

それぞれのフラットファイルからダークファイルを引いたファイル名のフラットサブリストは以下のコマンドで得られる。

```
ecl> !cat flat.list | sed -n 's/.fit/s.fit/p' > flat-sub.list
```

flat-sub.list : フラットサブリスト

内容 flat_001s.fit

.....

flat_010s.fit

フラット画像からダーク画像の減算

各フラット画像からダーク画像を差し引き、別名で保存する。例えば、フラット画像 flat_001.fit から dark10sec.fit を引いた fit ファイルをファイル flat_001s.fit として保存する。

```
ecl> imarith @flat.list - dark10sec.fit @flat-sub.list
```

さらに、統計量を調査しておくが良い。

```
ecl> imstat @flat-sub.list
```

```
#IMAGE NPIX MEAN STDDEV MIN MAX
```

```
flat_001s.fit 1048576 493.3 31.68 323. 2874.
```

.....

フラット画像の規格化

フラット画像毎にカウントの平均値が異なるので、これを 1 に規格化する。

```
ecl> normalize @flat-sub.list
```

統計量は次のように変化する。

```
ecl> imstat @flat-sub.list
```

```
#IMAGE NPIX MEAN STDDEV MIN MAX
```

```
flat_001s.fit 1048576 1. 0.06422 0.6548 5.826
```

.....

フラット画像の合成

S/N 向上のため、規格化した 10 個のフラット画像をメディアン（中央値）で合成し、ファイル flat.fit を得る。

```
ecl> imcombine @flat-sub.list flat.fit combine=median
```

(4) オブジェクト画像補正

オブジェクト画像補正用ダーク画像合成

40 秒露光と 60 秒露光のオブジェクト画像補正用ダーク画像をメディアンで合成し、ファイル dark40sec.fit と dark60sec.fit を得る。

```
ecl> imcombine @dark40sec.list dark40sec.fit combine=median
```

```
ecl> imcombine @dark60sec.list dark60sec.fit combine=median
```

ダーク補正済オブジェクトリストの作成

オブジェクトファイル名 001001.fit に「s」を付けて、補正済みファイル名 001001s.fit とするよう、ダーク補正済オブジェクトリストを作成する。

```
ecl> !cat object40sec.list | sed -n 's/.fit/s.fit/p' > object40sec-sub.list
```

```
ecl> !cat object60sec.list | sed -n 's/.fit/s.fit/p' > object60sec-sub.list
```

ここで、40 秒用には 232 個、60 秒用には 12 個のファイル名が入っている。

ダーク画像の減算

すべてのオブジェクト画像からダーク画像を差し引く。ただし、同じ露出時間どうしで行う。

```
ecl> imarith @object60sec.list - dark60sec.fit @object60sec-sub.list
```

```
ecl> imarith @object40sec.list - dark40sec.fit @object40sec-sub.list
```

フラット補正済オブジェクトリストの作成

オブジェクトファイル名 001001.fit に「f」を付けて、ダークとフラット補正済みファイル名 001001f.fit とするよう、フラット補正済オブジェクトリストを作成する。

```
!cat object40sec.list | sed -n 's/.fit/f.fit/p' > object40sec-flat.list
```

```
!cat object60sec.list | sed -n 's/.fit/f.fit/p' > object60sec-flat.list
```

ここで、40 秒用には 232 個、60 秒用には 12 個のファイル名が入っている。

フラット補正

合成済みのフラット画像 flat.fit で、すべてのダーク補正済オブジェクト画像を割る。

```
ecl> imarith @object60sec-sub.list / flat.fit @object60sec-flat.list
```

```
ecl> imarith @object40sec-sub.list / flat.fit @object40sec-flat.list
```

3-2. 測 光

コマンド「epa phot」による対話モード測光が可能である。画像表示ソフト ds9 の画面の比較星にマウスカーソルを当てて、スペースキーを押すと星像のプロファイルが表示され、「a キー」を押すと、xgterm に簡単な測定結果が表示される。さらに、同一画像データ上で、変光星についても同様の操作で測定を行う。全ての整約データについて、比較星の測光を行うが、ファイル名の入力が目まぐるしく時間がかかるので、自動化したい。

(1) 画像の位置情報取得

多数の整約済ファイルについて、パラメータを

変更して繰り返す測光作業を自動化する。そのため、変光星と比較星の画像上での位置情報を取得する必要がある。

整約済オブジェクト画像のリスト作成

```
$ ls *.fit > filelist.txt
```

この filelist.txt をエディタで開き、時系列に並べなおす。xgterm 上で

```
ec1> imexa @filelist.txt 1 keep+ log=coords-data.txt
```

を入力後、画像表示ソフト ds9 上で、最初に比較星の上で「a」を押下し、次に変光星の上で「a」を押下する。「n」を押下し次の画像を表示させ、同じ作業を続けていく。これらの結果はファイル「coords-data.txt」に保存される。終わるときは「q」を2回押下する。これらの結果は「cmp-coords.txt」という名前のファイルに保存されていき、内容は以下ようになる。

```
$ more coords-data.txt
```

```
# [1] 231735f.fit -
```

```
#COL LINE COORDINATES . . .
```

```
600.07 653.40 600.07 653.40 . . .
529.48 539.81 529.48 539.81 . . .
```

この imexa の結果 (coords) は 3,4 列が簡易測光した重心座標の x,y 座標に対応している。簡易測光の場合これは押下した x,y 座標と同じである。1行が比較星、2行が変光星の位置情報であるが、別ファイルに保存するよう測光する方が簡単かも知れない。

ファイル名と比較星の座標の対応リスト作成

```
$ cat coords-data.txt | awk '{ if(NR % 3 == 1) {fname = $3; } else if(NR % 3 == 2){ print fname, $3, $4; } }' > coords-data-r1.txt
```

内容は以下のとおりである。

```
$ more coords-data-r1.txt
```

```
231735f.fit 600.07 653.40
```

```
. . . . .
```

座標ファイル名と座標の対応リスト作成

```
$ cat coords-data-r1.txt | sed -n 's/.fit/.coo.r/p' > coords-data-r2.txt
```

内容は以下のとおりである。

```
$ more coords-data-r2.txt
```

```
231735f.coo.r 600.07 653.40
```

```
. . . . .
```

座標ファイルに座標を書き出し

```
$ cat coords-data-r2.txt | awk '{ print $2, $3 > $1 }'
```

座標ファイル名のリスト作成

```
$ cat coords-data-r2.txt | awk '{ print $1 }' > coords-r.list
```

同様にして、変光星のリストを作成する。「r」

が「v」に変わることには注意する。

```
$ cat coords-data.txt | awk '{ if(NR % 3 == 1) {fname = $3; } else if(NR % 3 == 0){ print fname, $3, $4; } }' > coords-data-v1.txt
```

```
$ cat coords-data-v1.txt | sed -n 's/.fit/.coo.v/p' > coords-data-v2.txt
```

```
$ cat coords-data-v2.txt | awk '{ print $2, $3 > $1 }'
```

```
$ cat coords-data-v2.txt | awk '{ print $1 }' > coords-v.list
```

(2) アパチャ測光の半値幅 (FWHM) の決定

天体を中心とする測光範囲の指定のため半値幅 FWHM (Full Width at Half Maximum) を決定する必要がある。ここでは比較星について吟味する。

```
$ cat coords-data.txt | awk '{ if(NR % 3 == 1) {fname = $3; } else if(NR % 3 == 2){ print fname, $13, $14, $15; } }' > FWHM-r.txt
```

「FWHM-r.txt」の内容を見ると、ENCLOSED, MOFFAT, DIRECT の値とも、032233f.fit の後に行ったピント変更により大きく変化していく。そこで「235233f.fit～000623f.fit」(60 秒露光)

「001001f.fit～032233f.fit」(ピント変更前, 40 秒露光) と「032842f.fit～043822f.fit」(ピント変更後, 40 秒露光) に分けて、より実際の星像に近いプロファイルである MOFFAT の値で FWHM を吟味する。ここでは「001001f.fit～032233f.fit」の比較星について吟味する。

```
$ cp FWHM-r.txt FWHM-r-2.txt
```

「FWHM-r-2.txt」の内容を「001001f.fit～032233f.fit」(ピント変更前) にする。FWHM として、154 個の MOFFAT の平均を使用することにする。

```
$ cat FWHM-r-2.txt | awk '{ sum += $3; num++; } END{ print "sum=" sum; print "average=" sum/num; }'
```

```
sum=1000.54
```

```
average=6.49701
```

これより

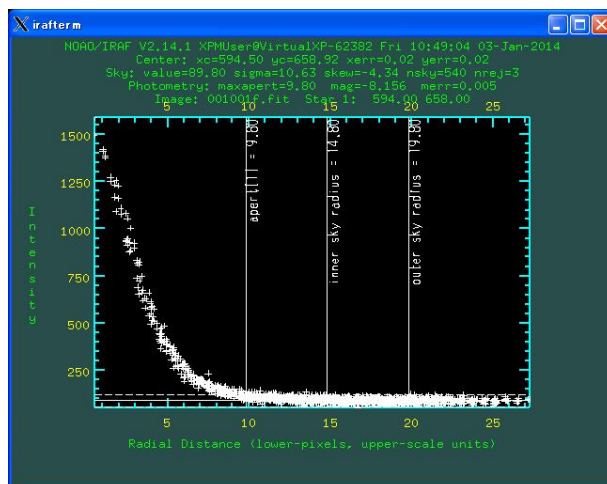


図4 比較星 USNO-A2.0 1350-00691230IRAFn の星像プロファイル

fwhmpsf=6.5 (FWHM)
 cbox=13 (FWHM の 2 倍程度)
 annulus=14.8 (スカイの内径, apertur+1.0 だが,
 +5.0 にする)
 apertur=9.8 (FWHM の 1.5 倍)
 ようにパラメータを設定する. 比較星の星像プロファイルを図 4 に示す.

その他の時間帯の画像データファイルと変光星の場合についても同様に吟味する.

(3) 測 光

比較星, 変光星の FWHM の値が同じであるので, 露出時間, ピント変更で分けて, 測光する. そのためのファイルリストを作成する.

```
ecl> cp filelist.txt filelist-1.txt
      235233f.fit~000623f.fit (露出 60 秒) 7 個
ecl> cp filelist.txt filelist-2.txt
      001001f.fit~032233f.fit (露出 40 秒, ピント
      変更前) 154 個
ecl> cp filelist.txt filelist-3.txt
      032842f.fit~050543f.fit (露出 40 秒, ピント
      変更後) 78 個
```

測光用の比較星座標リスト
`$ cp coords-r.list coords-r-1.list`
`$ cp coords-r.list coords-r-2.list`
`$ cp coords-r.list coords-r-3.list`
 測光用の変光星座標リスト
`$ cp coords-v.list coords-v-1.list`
`$ cp coords-v.list coords-v-2.list`
`$ cp coords-v.list coords-v-3.list`
 の内容をファイルリストに合わせる.

ファイルリスト「filelist-2.txt」の変光星の測光

```
ecl> epa phot
「image」に「@filelist-2.txt」, 「coords」に
「@coords-v-2.list」, 「interac」を「yes」から
「no」, fwhmpsf=6.5, itime=40 (秒), cbox=13,
annulus=14.8, apertur=9.8, zmag=22
としてパラメータ設定と連続測光を行う.
```

(4) 測光結果の取り出し

比較星

```
ecl> txdump *.mag.1 IMAGE,XINIT,YINIT,XCENT
ER,YCENTER,OTIME,FLUX,MAG, MERR yes >
r-result-1.txt
```

変光星

```
ecl> txdump *.mag.2 IMAGE,XINIT,YINIT,XCENT
ER,YCENTER,OTIME,FLUX,MAG, MERR yes >
v-result-1.txt
```

時系列に並べ替えたファイルを「r-result-1.txt」
 「v-result-1.txt」とする.

ファイル名と時刻 (UT), フラックス, 機械等級,
 誤差の取り出し

比較星

```
$ cat r-result-1.txt | awk '{ print $1",",$6",",$7",",
$8",",$9 }' > r-result-2.txt
```

変光星

```
$ cat v-result-1.txt | awk '{ print $1",",$6",",$7",",
$8",",$9 }' > v-result-2.txt
```

改行コードの変換

Windows のテキストファイルの改行コードは CRLF (=0x0d,0x0a) であるが, UNIX では LF (=0x0a) である. そこで, Windows 用に改行コードを変換する.

比較星

```
$ cp r-result-2.txt r-result-3.txt
```

```
$ unix2dos r-result-3.txt
```

変光星

```
$ cp v-result-2.txt v-result-3.txt
```

```
$ unix2dos v-result-3.txt
```

次に Excel を用いて, これら測光結果から光度曲線を描く.

4. 解析結果

比較星に対する等級差をグラフにしたものを図 5 と図 6 に示す. 縦軸は比較星に対する等級差 Δm で横軸は世界時刻 UT である.

光度曲線には, くだらかに変化する部分やあま

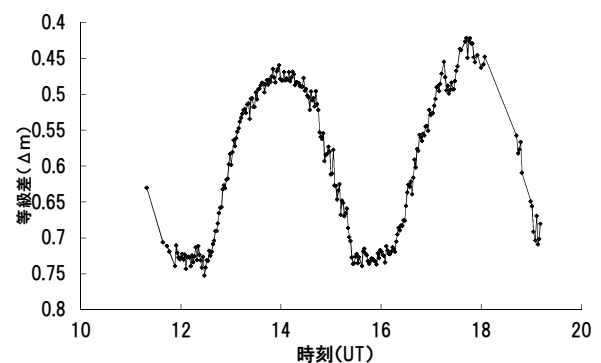


図 5 V1191Cyg の光度曲線

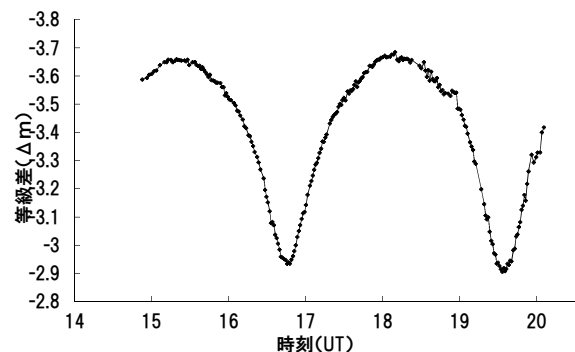


図 6 V0523Cas の光度曲線

り変化のない部分, 急激に変化している部分があることが分かる. また, 次の変光の半周期を求める.

① 極大時のピークから次のピークまでの間

② 極小時のピークから次のピークまでの間

光度曲線の山あるいは谷のグラフをベキ近似により数式化し, 数式処理ソフトを用い極大・極小の時間を求める. ①と②の時間の2倍の平均をとることで変光星の周期を求める. 公転周期は V1191 Cyg が7時間23分(図5)で, V0523 Cas は5時間37分(図6)となった.

5. 考察

両変光星とも光度曲線に同様な特徴があり, 以下のように仮定することで, その説明ができる.

仮定1: 公転面上に地球がある

仮定2: 星が接近している

仮定1より, 地球から見た星の断面積が食によって変化すること, 仮定2より, 星の明るさは極大極小時に連続的に変化し, 平坦な部分がないことが説明できる.



図7 連星大小関係推定(左: V1191 Cyg, 右: V0523 Cas)

V1191 Cyg の場合

さらに, 仮定3: 星の大きさは近いがやや異なる(図7左), をおくことにより, 星の明るさは極小時に変化しない時間帯が短時間あることが説明できる. そして, 文献データ⁵⁾として, この食連星タイプは, 共通の大気を持ち, 近い大きさの連星系であるおおぐまW型(EW)である. 周期は7時間31分であるから, 分析結果はほぼ一致している.

V0523 Cas の場合

さらに, 仮定4: 二つの星の大きさはほぼ等しい(図7右), をおくことにより, 星の明るさは極小時に急激に変化することが分かる. そして, 測定誤差を考慮しても, 図6よりわずかであるが主極小(図6右側), 副極小(図6左側)があることが判断できるので, 二つの星の明るさがやや異なる可能性がある. また, 文献データ⁵⁾として V0523 Cas もおおぐまW型(EW)であり, 周期は5時間31分であるから, 分析結果はほぼ一致している.

6. 結 言

短周期食連星を測光観測し光度曲線を作成した. その光度曲線から公転周期と星の大小関係を考察した. V1191 Cyg は極小が平坦で, V0523 Cas は極大と極小がはっきりしていた. V1191 Cyg の極小は平坦ではあるが滑らかではなく, V0523 Cas のデータに比べての精度が不足している. この精度不足は V1191 Cyg の近くに恒星があることによる測光の難しさと, 使用した望遠鏡の広視野(スペースデブリ発見のため100分×100分)と分解能が原因ではないかと考えられる.

本取組では, 新しい食連星を発見しているわけではない. 地上で行われる科学実験と違い天体の観測データは多数あるわけではなく, 本取組により, 短周期食連星 V1191 Cyg, V0523 Cas に対して観測データと解析を追加することができた.

また, IRAF はコマンド入力により, データ整約や解析を行う非常に有用なソフトウェアであるが, 初学者にとっては敷居が高い. そこで, 本稿ではデータ整約と連続測光の具体的な方法をまとめた.

連星間距離などの物理量を引き出すには分光観測を併用しなくてはならない. 今後は測光観測と分光観測について, 美星天文台の装置に加え本校の天体観測システムにて行い, 食連星の調査を進めたい.

今回の観測について, 星の学校2013スタッフ, 美星天文台, 美星スペースガードセンターの皆様にお世話になりました. ここに深謝致します. なお, 本取組と調査は科学研究費補助金(佐々井, 23501047)を受けて行ったものであり, ここに謝意を表します.

参 考 文 献

- 1) J. Kallrath and E. F. Milone : *Eclipsing Binary Stars: Modeling and Analysis*, Second Edition, Springer (2009).
- 2) 永井和男の食変光星観測のページ : <http://eclipsingbinary.web.fc2.com/>
- 3) 川端哲也, IRAF による分光データ整約のすすめ 第1版 (2005年5月) : <http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/koubo/manual/index.html>
- 4) ライトカーブ解析の手引き : http://www.toybox.gr.jp/mp366/lightcurve/ana_guide.html
- 5) SIMBAD Astronomical Database : <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>