2011年度基礎天文学観測 小望遠鏡による基礎観測実習

東京大学理学部天文学科 3年 学生証番号 05112007

西嶋颯哉

January 20, 2012

1 概要

1 概要

1.1 実習の目的

東大天文センターの 30 cmカセグレン望遠鏡を用いて、CCD カメラによる基本的な天体観測を行う。今回は、

- システム効率および等級原点の測定
- 限界等級の算出
- 再観測による各数値の再評価

を軸として観測及び解析を行った。

1.2 日程

今回の観測実習は、次の日程で行った。第2回は天候に恵まれず、ドームを開くことができなかった

第1回	11/10 16:00-	説明会
第2回	11/14 18:00-	flat 取得
第3回	11/21 18:00-	観測1
第4回	11/28 18:00-	データ解析 1
第5回	12/5 18:00-	観測 2
第6回	1/6 13:00-	データ解析 2

ため、懐中電灯を用いた flat frame の取得を行った。第3回は望遠鏡操作を習得するという意味も あって多くの星を観測し、そのうち upsilon Andromedae のフレームを用いてシステム効率や限界等 級の算出を行った。この限界等級を検証するために、第5回で alpha Casiopea について多くの観測 を行い、その周辺にある暗い星がどの程度見えるのかを測定することによって求めた限界等級の値が 妥当であるかを検証した。

1.3 基本知識

実習の内容に入る前に、今回の実習で用いた知識についてごく簡単にまとめておく。

1.3.1 システム効率

天体の明るさからのみ決定される望遠鏡に入射するべき光子数に対する、CCD で電荷として読みだ された光子数の割合のことであり、次の計算によって求められる。天体から望遠鏡に入射するべき光 子数を *s_i*[個/s] とすれば、

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{\Delta \lambda F_\lambda}{h\nu} \tag{1}$$

ただしここで、

D:望遠鏡の口径 [cm] F_{λ} :天体からのフラックス [erg/s/cm²/ μ m] $\Delta\lambda$:フィルターの波長範囲 [μ m]

である。次に CCD で生じた電荷の個数を n_i [e⁻/s] とすると、

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \tag{2}$$

ここで、

この二つの値を用いて、システム効率 η は

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} [e^-/\text{photons}] \tag{3}$$

で求められる。今回の観測では、これまでの性能評価資料などから

$$\begin{aligned} D &= 30 [\text{cm}] \\ \Delta \lambda &= 2 \times 10^{-1} [\mu\text{m}] \\ f_{conv} &= 0.947 [\text{e}^{-}/\text{count}] \end{aligned}$$

の値を用いた。このうち、フィルターの波長幅については 420nm-620nm でだけ透過率が1となる矩形で近似した。

1.3.2 等級原点

等級原点 *Z_{mag}* とは、カメラシステムで1秒間の積分で1カウントの信号を生じさせるような天体の 等級のことである。これが求められれば任意のカウントの信号を生じさせる天体の等級を求めるこ とができる。*m* 等級の星を *t* 秒積分した時に *N* カウントの信号が生じるとすると、

$$N \propto 10^{-m/2.5} t \tag{4}$$

なので、定数 Cを用いて

$$\log\frac{N}{t} = -\frac{m}{2.5} + C \tag{5}$$

と表すことができる。この式で、求める値 $Z_{mag} = 2.5C$ と表せることが分かるので、

$$Z_{mag} = m + 2.5 \times \log \frac{N}{t} \tag{6}$$

である。

1.3.3 空の背景光

星の写っていない領域に入射している光の量を [photons/s/arcsec²] ないし [mag/arcsec²] で表す。

1.3.4 限界等級

システム効率 η を求めると、等級によって CCD で読みだされるカウントの量が決まる。このカウント量とノイズ成分との比が S/N である。S/N は一般に等級が暗くなるほど小さくなるが、光赤外の分野では S/N = 5 までの星を「検出できた」とすることが多い。今回はデータのゆらぎが大きいことが予想できるので、S/N = 10 を検出目標に設定した。S/N は、

$$S/N = \frac{n_i t}{N_{noise}} = \frac{\eta s_i t}{N_{noise}} \tag{7}$$

で計算することができる。N_{noise}については、検出器の読み出しノイズ、入射光子や空の背景放射と検出器の暗電流のポアソンノイズの二乗和をとったものであり、

$$N_{noise} = \sqrt{\left(\sqrt{n_i t}\right)^2 + \left(\sqrt{n_{sky} t}\right)^2 + \left(\sqrt{n_{dark} t}\right)^2 + N_{read}^2} = \sqrt{n_i t + n_{sky} t + n_{dark} t + N_{read}^2}$$
(8)

ここで、

である。これは単素子の場合の式であるので、今回の CCD のように複数素子の場合はこれを統計的 に足し合わせる必要がある。*m* 個のピクセルに広がった像を検出する場合、

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + n_{sky} t + m n_{dark} t + m N_{read}^2} \tag{9}$$

と表される。一次リダクションを終えた frame からそれぞれの項の値を読み取り、S/N = 10 を与え るような限界等級を求める。

1.3.5 一次リダクション

望遠鏡に入射した光子は、CCDで電子に変換され、一定の積分時間だけ各ピクセルに蓄積されてAD 変換を経て電子数に比例した (この比例係数がコンバージョンファクターである) カウント数が FITS ファイルに保存される。光子数と電子数の関係は完全に線形であるわけではないが、今回の観測で は線形性を仮定する。理想的な CCD では frame 全体に渡って光子数からカウント数への変換が均一 な比例関係をなすが、その過程の中でカウント揺らぎが生じるため、次のような画像処理が必要に なる。

• bias+dark 引き

光子が入射していない場合でも、AD 変換を経たカウント数はノイズにより ±α の不安定性を もつ。カウント数が負の値にならないように変換の際には一定の bias 電圧をかける。また、電 子数には暗電流 (dark current) が混ざってしまう。暗電流は温度が高いほど大きくなるので装 置全体は冷却されている。この不定性を除くために、天体の画像 (objct frame) と同じ積分時 間でシャッターを開かずに取得する dark frame を引き算する。ただし、昨年度のレポートで報 告されているようにこの装置では bias が一定ではないなどの問題があり、うまく除くことは難 しい。

• flat 補正

光学系によっては視野端で減光を受ける場合があったり、フィルター全体で透過率が一定では ない、CCD の量子効率がピクセルごとに異なるなどの問題があり、それを補正しなければな らない。具体的には、視野全体で光量一定の光源を撮像し、その frame で object frame を割り 算する。今回は、懐中電灯を用いて flat frame を取得した。

● sky 引き

object frame には、天体からの光だけではなく、大気の放射光や望遠鏡周囲からの光が入って いる。これらの光を sky と呼ぶ。これは時間変動するので、それぞれの frame で星の写ってい ない領域のカウント数を平均して引けばよい。また、星の位置をずらした複数の画像をとって 引き算する方法もある。今回は後者の方法を適宜適用した。

1.4 観測機器

観測に使用した望遠鏡および CCD カメラの概要は次のとおりである。

30cm 望遠鏡
 赤道儀式反射望遠鏡で、ガイド用の副望遠鏡2本つき。

口径	$30.0[\mathrm{cm}]$
焦点距離	5000[mm] (F16.7)
プレートスケール	$41[\operatorname{arcsec/mm}]$

• CCD カメラ

Finger Lake Instrumentation 社製 Proline PL4021。

フォーマット	2048×2048
アレイサイズ	15.2 mm $\times 15.2$ mm
ピクセルサイズ	$7.4 \mathrm{um} \times 7.4 \mathrm{um}$
Full Well	40,000e-/pix

1.5 データ解析および測光

今回は、上記の一次リダクションや測光には天文解析ソフト IRAF のコマンドを使用した。また、 FITS ファイルの表示には ds9 を用いた。

2 flat frame (11/14)

第2回で行った flat frame の取得についてまとめる。

2.1 撮像方法

天候が悪かったためドームは開かず、ドーム内の白い壁に懐中電灯の明かりを照らしてそれを望遠鏡 で写すという方法をとった。細かい試行錯誤を重ね、最終的には

- 懐中電灯を段ボールで包むことで光軸をできる限り絞り、
- もっとも明るい位置を望遠鏡の視野中心に合わせる

という手法で 5 秒積分した frame を 10 枚取得し、flat frame の元画像とした。この 10 枚を平均した ものが flat5s.fits (Figure 1) である。



Figure 1: flat5s.fits

中心上部が明るく、いくつかの円形の領域でムラがあることがわかる。この感度ムラについて、懐中 電灯の明かりのムラであるかどうか調べるために懐中電灯をあてる向きをずらして同様に撮像した が、中心上部が明るいという傾向に変わりは見られなかった。また、円形のムラはフィルターに付着 したゴミではないかという仮説を立て、その検証としてフィルター自体を若干上下に位置をずらして 撮像したが、同様に frame の明るさのムラは変化しなかった。これらの検証から、flat5s.fits に見ら れる感度ムラは光源の明るさムラやフィルターの汚れによるものではないことが分かる。

次に、biasによるムラを補正するために、11/21に取得した bias frame (ANOA00003496.fits;Figure 2) を引いてみたが、bias frame に見られる縞模様によってむしろ画像が汚くなってしまう傾向が確認 されたため、この bias frame の平均値を一様に引き算することで bias 引きを行ったことにした。こ れで得られたのが flat5snew.fits(Figure 3) であり、カウント数の統計量は Table 1 のようになった。

平均值	9779
標準偏差	119.6
最小値	7492
最大値	10971

Table 1: flat5snew.fits の統計量

このままでは画像を flat で割り算した時にカウント数が小さくなってしまうので、平均値が1になる

ように規格化した。その frame が flatmean1.fits(Figure 4) であり、今回の実習で得られた flat frame である。



Figure 2: ANOA00003496.fits



Figure 3: flat5snew.fits



Figure 4: flatmean1.fits

2.2 flat frameの問題点

画像端のけられによる感度の差や CCD の量子効率の違いは基本的には一定であると見ることができ るので、この flat frame を全ての観測日の観測に対して適用した。しかし、今回の flat frame 生成に は明らかにいくつかの問題点があるので、まとめて記録する。

bias frame について

11/14 の実習で bias および dark の frame を取得するのを忘れていたため、結局、11/21 に取 得した積分時間 0sec の bias frame の平均値を引き算することになってしまった。bias の特性 が観測日によって変化しないのであれば問題はないが、過去のレポートによると全くそんなこ とはないようなので、このことはかなり問題となると思われる。また、bias frame の引き方自 体にしても、複数の frame を平均したりする処理を行わず、縞模様が見えていたため単に平均 値を使うという方法をとってしまった。このことについては、過去のレポートを参考に除去す る工夫を施すべきであったかもしれない。また、後に議論するが、使用した CCD の特性なの か、bias frame はほとんどノイズの除去には使えないことが後になって判明した。このことを 考えると、シャッターを開かず 5sec 積分した dark frame を使って bias+dark 引きをした方が 適切だったかもしれない。 一様光源の問題

今回は懐中電灯を用いたが、それが best の方法であったかというとそうではないように思う。 懐中電灯の光では、目視で明らかに明るさにムラがあり、それが flat frame の精度に影響を与 えている可能性は否定できない。ある程度は位置を変えて比較実験を行ったが。この実習のよ うな設備ではもともと完全に一様な光源を用意することが難しいので、やはり曇天を利用した sky flat を取得することが最良に思える。

• 円形の感度ムラについて

得られた flat frame には、はっきり分かる円形の感度ムラがいくつもある。もちろんこれが本 当に CCD の感度差によるものである可能性も排除できないが、何らかの方法で原因を突き止 めるべきだったように思う。今回、フィルターの汚れは原因でないということは分かったが、 主鏡や副鏡の汚れなど、簡単に検証できる要因はほかにもあったので、確かめてできれば排除 したかった。

3 第1回観測(11/21)

第1回目の観測ではいくつかの天体を撮像した。そのうち、upsilon Andromedae の object frame に ついて IRAF で測光を行い、システム効率・等級原点・背景光・限界等級を算出した。

3.1 観測条件

観測時の気象条件は次のようであった (気象庁の web ページより引用、東京都東京地方 21 時)。

天気	晴れ
雲量	3
湿度	53%
風	北東 2.9m
月齢	25.3

これは観測地点が三鷹とは少し離れているが、実際の天候は晴れ時々曇りで、雲によって天体が隠さ れてしまい、雲が晴れるのを待たなければならない状況が何度かあった。

3.2 観測天体

xplns で調べた観測天体の概要を示しておく。ただし、方位角と高度角については 19:00 の値である。

天体	等級	赤経	赤緯	方位角	高度角
木星	-2.8	2h2.0m	$10^{\circ}54'$	293.44°	45.53°
upsilon Andromedae	4.1	1h36.8m	$41^{\circ}24'$	247.30°	62.52°
M31(NGC224)	3.5	0h42.7m	$41^{\circ}16'$	244.69°	72.62°
マルカブ	2.49	23h4.8m	$15^{\circ}12'$	-	-

3.3 木星

等級が-2.8 等と明るく、視野に入れやすいため最初に撮像した。0.2 秒積分の frame を示す (ANOA00003412.fits;Figure 5)。木星の縞模様や、ガリレオ衛星が確認できる。ただし、木星本体は 40,000 カウントを超えてい るため、飽和しているものと思われる。bias frame で確認された、昨年のレポート同様の sin ゆらぎ ものっていることが分かる。

3.4 マルカブ

1 秒積分では飽和しているように見えたので、0.3 秒積分で星の位置を3か所変化させて複数の frame を取得した。得られた frame の一部を示す (Figure 6)。



Figure 5: 木星を撮像した ANOA00003412.fits。左右でスケールが違うため、見え方が異なっている。





Figure 6: マルカブ。0.3 秒積分で星の位置を変えたもの。

3.5 M31(NGC224)

いわゆるアンドロメダ銀河である。暗いためファインダーでとらえるのが困難だったが、30 秒積分 では明らかに恒星とは異なる像を見ることができた (Figure 7)。また、周辺にいくつか恒星のよう なものも写っていることが分かる。昨年度のレポートによれば、この CCD のピクセルスケールは 0.27[arcsec/pix] であるので、視野は 9.2' である。SIMBAD によれば、この銀河の大きさは 45' × 25' であるので、おそらく銀河中心のほんの一部を見ていると思われる。



Figure 7: ANOA00003499.fits。恒星と違い、もやっとした明るさが広がっていることが確認できる。

3.6 upsilon Andromedae

この日の観測で測光を行ったのはこの天体についてだけである。まず取得した frame を示し、1 次リ ダクションの方法と測光の結果を示す。

4.1 等と暗いため、視野に入れるのに若干苦労した。副鏡に様々な星が見えている中で一番それら しいものを視野中心に移動するという方法をとったため、間違った星をとらえている可能性は否定で きない。とにかくも、5sec 積分の frame が ANOA00003477.fits(Figure 8) である。解析はこの frame について行った。この日の観測中に取得した 0 秒積分の bias frame(ANOA00003496.fits) をまず引き 算したが、より縞模様が強くなってしまうので、flat frame のときと同様に平均値の 2365 カウント を一様に引き、さらに flat frame で割り算した。このリダクションを経た frame が test4.fits(Figure 9) である。





Figure 8: ANOA00003477.fits。明るい左が ups And(?)。

Figure 9: test4.fits。1 次処理後の ups And。

かなり荒っぽいリダクションとなったため、縞模様が除去できていないこと、sky がまだかなり 残った frame になってしまっていることは否定できない。星の写っていない領域のカウント数は、お おむね 10-80 程度であった。ただし、IPAF の測光タスク phot では、sky を推定して引き算すると いう計算を行ってくれるので、sky のゆらぎが frame の局所で非常に大きい場合以外は、1frame で 1 つの星しか測光しないときには sky はそれほど効いてこないと考えられる。

frame 左側にある ups And(と思われる星) を測光した結果は次のようになった。

アパーチャー半径	50
アパーチャー内の sky 込みカウント	19893592
アパーチャー面積	7854.25
sky を引いたアパーチャー内のカウント	19245328
等級	-
等級誤差	0.000

ただし、アパーチャー半径については、imexam で調べた FWHM の値が 20pix 程度であるので、 アパーチャー直径が FWHM の5倍程度ということになり、適切ではないかもしれない。そこで、ア パーチャー半径を 40pix にした測光も行った。これらの数値をもとに、次の様々な値を求める。

アパーチャー半径	40
アパーチャー内の sky 込みカウント	18935693
アパーチャー面積	5026.713
sky を引いたアパーチャー内のカウント	18520804
等級	-
等級誤差	0.000

3.6.1 システム効率

天体からのフラックス F_{λ} は、

$$F_{\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} F_{\nu} \tag{10}$$

で変換できる。単位周波数あたりのフラックスは、

$$F_{\nu} = 10^{-\frac{m+48.6}{2.5}} [\text{erg/s/cm}^2/\text{Hz}]$$
(11)

である (m は天体の等級)ので、今回の観測中心波長 520[nm] から、単位に注意して計算すると、

$$F_{\lambda} = \frac{3 \times 10^{14} [\mu \text{m/s}]}{(520 \times 10^{-3} [\mu \text{m}])^2} \cdot 3.631 \times 10^{-20} \cdot 10^{-0.4m}$$
(12)

$$= 4.028 \times 10^{-5} \cdot 10^{-0.4m} \tag{13}$$

$$= 9.23 \times 10^{-7} [\text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}]$$
(14)

(15)

したがって、ups And の場合の望遠鏡に入射する光子数 si は次のように計算できる。

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{\Delta \lambda F_\lambda}{hc/\lambda} \tag{16}$$

$$= \pi \left(\frac{30}{2}\right)^2 \frac{2 \times 10^{-1} \cdot 9.23 \times 10^{-7}}{6.63 \times 10^{-27} [\text{erg} \cdot \text{s}] \cdot 3.0 \times 10^8 [\text{m/s}] / 520 \times 10^{-9} [\text{m}]}$$
(17)

$$= 3.41 \times 10^{7} [/s]$$
(18)

$$(= 1.487 \times 10^9 \cdot 10^{-0.4m}) \tag{19}$$

である。次に、CCD で生じた電荷の個数 n_i は、アパーチャー50pix のとき

$$n_i = \frac{19245328 \times 0.947}{5.0} \tag{20}$$

$$= 3.64 \times 10^{6} [e^{-}/s] \tag{21}$$

(22)

したがって、システム効率ηは、

$$\eta = \frac{3.64 \times 10^6}{3.41 \times 10^7} = 0.107 \tag{23}$$

である。

3.6.2 等級原点

式(6)より、アパーチャー50pix での等級原点は、

$$Z_{mag} = 4.1 + 2.5 \times \log \frac{1.925 \times 10^7}{5} = 20.6 \tag{24}$$

となる。

3.6.3 空の背景光

IRAF の phot タスクでの出力により、sky を推定することが可能である。ただし、今回はリダクションによって完全に dark を除けてはいないことが明瞭であり、 n_{dark} を求めるのも困難なので、わかるのは n_{sky} と n_{dark} を合わせた値であり、単素子あたりの背景ノイズ n_{bg} [e⁻/s/pix] である。その値は、

$$n_{bg} = \frac{19893592 - 19245328}{7854.25} \cdot \frac{0.947}{5.0} = 15.6[e^{-}/s/pix]$$
(25)

である。ピクセルスケール 0.27[arcsec/pix] より、1 ピクセルは、0.0729[arcsec²] に相当する。したがって、システム効率を考えて、空の背景光 s_{bg} [photons/s/arcsec²] は

$$s_{bg} = \frac{15.6}{0.107 \cdot 0.0729} = 2.00 \times 10^3 [\text{photons/s/arcsec}^2]$$
 (26)

また、これを等級に換算したい。1 秒あたりのカウント数 N/t と等級の関係は、式 (5) から

$$\log \frac{N}{t} = \frac{1}{2.5} \left(Z_{mag} - m \right)$$
(28)

となるので、背景光を等級に換算した値 m_{ba} [mag/arcsec²] は、

$$m_{bg} = 20.6 - 2.5 \cdot \log\left(\frac{n_{bg}}{0.947 \cdot 0.0729}\right) = 14.7[\text{mag/arcsec}^2]$$
 (29)

となった。東京の空であることを考えるとそれなりの値になったのではないだろうか。

3.6.4 限界等級

dark を完全には除くことができず、dark と sky を分けて考えることができないので、式 (9) は次の ように修正される。

$$N_{noise} = \sqrt{n_i t + m n_{bg} t + m N_{read}^2} \tag{30}$$

この式を用いて限界等級を求めたい。S/N = 10、t = 10、aperture = 50と設定する。ここで、読み出しノイズについては大沢さんのレポートを参照して $N_{read} = 12$ を採用する。このとき、S/N は $m \ge t$ の関数として次のようにあらわされる (以後、同じ文字を使ってしまっている等級の $m \ge \ell'$ クセル数の m に注意していただきたい)。

$$S/N = \frac{1.59 \times 10^8 \times 10^{-0.4m} \cdot t}{\sqrt{1.59 \times 10^8 \times 10^{-0.4m} \cdot t + 1.22 \times 10^5 \cdot t + 1.13 \times 10^6}}$$
(31)

ここに S/N = 10 と t = 10 を代入し、m について解く。

$$m = -2.5 \log(9.67 \times 10^{-6}) = 12.5 [\text{mag}]$$
(32)

したがって、限界等級は12.53等である。

昨年度レポートの値と比べると sky の値が若干大きくなっており、限界等級の値の計算でも重要 なファクターになっていることが分かる。今回は dark がうまく引けていない状況で sky を推定し、 また一次リダクションにおいて sky を引くための操作も何ら行っていないので、この sky の値、ひい ては限界等級の値は妥当ではないかもしれない。その辺りの議論については後に述べる。

3.6.5 aperture による値の比較

apaerture を変えて測光した2種類の結果が得られているので、まったく同様の計算によって様々な 計算値を求め、比較した。

	aperture50	aperture40
η	0.107	0.103
Z_{mag}	20.6	20.5
n_{bg}	15.6	15.8
m(限界等級)	12.5	12.8

以上から、aperture によってはほとんど値が変化しないことが分かる。もともと aperture 直径は FWHM の 4-5 倍なので、どちらにしろ星像は aperture 内部に収まっており、測光には影響を与えて いない。

(27)

4 第2回観測(12/5)

第1回観測で得られた等級原点や限界等級、背景光の値を検証するため、第2回観測では2.2等の星 alpha Casiopea を様々な積分時間で観測し、周辺の暗い天体まで測光するという手法をとった。ま た、第1回観測ではあいまいなままだった sky 引きについても検証した。

4.1 観測条件

観測時の気象条件を示す (気象庁の web ページより、東京都東京地方 21 時)。

天気	快晴
雲量	0
湿度	37%
風	北 2.1m
月齡	9.9

東京地方の天候と同様、三鷹でも快晴であり、第2回では雲待ちをすることなく観測ができた。

4.2 観測天体

天体	等級	赤経	赤緯	方位角	高度角
alpha Casiopea	2.2	0h40.5m	$56^{\circ}32'$	167.57°	68.69°

alpha Cas 周辺の星分布図 (aldin sky atlas より) を示しておく。



Figure 10: alpha Cas 周辺の星。スケールは 8.752′ × 8.333′。緑の印のあるものが測光データのある もの。

周辺天体の等級などについては後に記す。

4.3 取得 frame

4.3.1 object frame

視野内でさまざまに目標天体の位置を変化させながら、1sec、10sec、60sec、120secの frame を複数 取得した。それぞれの生データを Figure 11 に示した。



Figure 11: 左上: 1sec、右上: 10sec、左下: 60sec、右下: 120sec。aladin 画像の向きと合わせるために、全ての frame は 270 度回転と x 軸反転をかけている。積分時間がますにつれて暗い星がたくさん見えるようになった様子がよくわかる。

4.3.2 bias/drak frame

bias frame は、0 秒積分を 10 枚とって平均したもの (biasmean.fits;Figure 12) を、dark frame は 1,10,60,120 秒積分をそれぞれ 10,10,5,5 枚とって平均したもの (Firgure 13) を示す。



Figure 12: biasmean.fits。やはり sin ゆらぎの縞模様が見えている。

これらの frame について簡単にカウント数の統計量を Table 2 にまとめた。

このデータだけでは dark frame について統計的な議論をすることはできないが、dark のゆらぎ



Figure 13: 左から、dark の 1sec、60sec、120sec を平均したもの (10sec は不具合のため添付できず)。 積分時間の増加に伴い、sin ゆらぎがならされて縞模様がなくなる一方で画像内での明るさの差が大 きくなることが分かる。

	frame 数	平均值	標準偏差
bias	10	2339	8.206
dark[1sec]	10	2344	8.062
dark[10sec]	10	2118	11.88
dark[60sec]	5	2121	12.83
dark[120sec]	5	2121	12.30

Table 2: bias/dark frame について、カウント数の統計量。

については積分時間が大きくなっても大きくはならないことから、sky のゆらぎによって打ち消され る部分が多くなることが予想できる。また、dark current は値として大きくはないため、積分時間 が短いときの dark frame は bias frame とそれほど性質が変わらないということがいえる。したがっ て、1 次リダクション後の frame の背景光は、(今回の方法では)積分時間の短いとき bias+dark の ゆらぎが支配的で、積分時間が長くなると sky が支配的になると考えられる。本来ならば 1sec frame のようなものについては、sin ゆらぎを除く工夫をすることで n_{bg} は小さくできると思われるが、今 回は行わなかった。

CCD に暗電流がのるだけだと考えれば、dark のカウント数は時間的に単調に増大するべきであ るが、今回はそうではなくカウントが減少した。この現象は昨年度のレポートでも報告されている が、今回はその詳細については考えなかった。

4.4 測光データ

今回は多数の星について測光を行ったため、各 frame についてまずはリダクションの方法を示し、 aladin sky atlas のデータと見比べて天体を同定した上で測光 data を示す。

4.4.1 1次リダクション

• 1 秒積分 frame

2frame の1秒積分を平均したものを、星の位置を変えた2種類用意した。これらの frame に対し、もとの frame から biasmean と darkmean を引いたものを比較したところ、ほとんど違いは見られなかった。そこで、1秒積分の dark を引き、flat で割ったものを測光用 frame とした。

結局、測光したのは acas1_1_2.fits(2 枚の 1 秒積分の平均) と acas1_2_3.fits(星の位置を変えた 2 枚の 1 秒積分の平均) である (Figure 14)。

• 10 秒積分 frame

1 秒積分と同じく、2frame の 10 秒積分を平均したものを 2 種類用意し、sky を引くためにこれ らの差をとった frame を作成した。リダクションについては、10 秒積分の dark を引き、flat で割り算する方法をとった。なお、sky 引きを行った frame については flat で割り算しただけ



Figure 14: acas1_2_3.fits.

である。

測光したのは、acas10_1_2.fits(2枚の平均) と acas10_3_2.fits(星の位置ををかえた 2 枚平均を 引き算したもの)である (Figure 15)。



Figure 15: $acas10_3_2.fits_{\circ}$

• 60 秒積分 frame

積分時間が長くなったため、望遠鏡のトラッキングで生じる誤差により frame の平均をとると星像 が揺らいでしまった。そのため平均はとらず、星の位置を変えた2種類の frame (acas60_1_2.fits, acas60_2_3.fits) と、別の2frame の差をとったもの (testacas60_2.fits) の3frame について測光 を行った。リダクションの方法は変わらず、60 秒積分の dark を引いて flat で割った。sky 引 きの frame については dark を引いていない。



Figure 16: 左: acas60_2_3.fits、右: testacas60_2.fits。

- 120 秒積分 frame
 - これも星像がゆらぐために平均はとらず、星の位置を変えた 2frame から 120 秒の dark を引 き、flat で割った 2frame について測光した (acas120_1_2.fits、acas120_2_2.fits)。

4.4.2 identification

120 秒積分の frame を用いて天体の同定を行う。まず、aladin sky atlas を参考にして、alpha Cas 周辺の可視で明るい星をリストアップする。ここでは、分かりやすくするために仮に tct001-tct007 の



Figure 17: 左: acas120_1_2.fits、右: acas120_2_2.fits。

通し番号を付けた。catalog(GSC2.3 および 2MASS-PSC) により、V 等級ないしは J,H,K 等級の値 を次の表に示した。一部測光データのない天体もある。

	V等級	J等級	H 等級	K 等級
tct001	8.98	-	-	-
tct002	11.01	-	-	-
tct003	-	11.17	10.77	10.71
tct004	-	-	-	-
tct005	-	10.11	9.538	9.384
tct006	-	11.36	11.06	10.92
tct007	12.14	-	-	-

それぞれの位置を Figure 18 に示した。



Figure 18: a Cas 周辺の星とその仮称。スケールは 13.13' × 12.5'。

それぞれについて、120 秒積分 frame 上での対応関係は次のようになる。



 Figure 19: 垂直水平線に対して;第1象限中央下 tct002、左 Figure 20: 垂直水平線に対して;第1象限中央下 tct000

 下 tct004、中央下より tct003。第3象限中央上 a Cas、中央 央左より tct006。第2象限左上 tct007。第4象限左上 a

 右上 tct001、右下 tct005。

4.4.3 data

適当な星について IRAF の imexam コマンドを用いて計算したところ、FWHM=12.5pix となった。 今回は暗い星の測光がメインであるので、aperture 半径は 20pix と、第 1 回観測のときのものより 小さめにとった。したがって、当然限界等級などの計算は修正されなければならない。それについて は後に述べる。測光データは Table 3 にまとめた。この表では phot タスクを用いて出力された (sky を除く) カウント数・sky カウント数・等級とその誤差をのせた。このうち、等級についても異なる aperture での等級原点(20.56 等)を用いているので、注意が必要である。

4.5 様々な議論

4.5.1 等級原点

まずは、等級原点の計算を再検証する。測光した 8 つの天体のうち、V 等級が与えられているのは残 念ながら 4 つだけである。S/N のいい (等級誤差の小さい) データのほうが信用できるので、alpha Cas と tct001(120sec) の 2 通りについて求める。

• alpha Cas

2つの frame は条件が同じなので、2つの値を平均する。

$$Z_{mag} = (2.2 \cdot 2 + 2.5 \cdot \log 1.080 \times 10^7 + 2.5 \cdot \log 1.066 \times 10^7)/2 = 19.78$$
(33)

tct001(120sec)
 同様に、平均をとる。

$$Z_{mag} = \left(8.98 \cdot 2 + 2.5 \cdot \log 2.225 \times 10^4 + 2.5 \cdot \log 2.263 \times 10^4\right) / 2 = 19.85 \tag{34}$$

2つの値は大きく変わってはいないので、平均をとり、新たに Z_{mag} = 19.82 とする。

object	frame	count[/s]	skycount[/s/pix]	magnitude	error[mag]
alpha Cas	acas1_1_2	10803153	90.18129845	2.976	0
	$acas1_2_3$	10662133	82.56326548	2.99	0
tct001	acas1_1_2	15516.75	-0.029280200	10.083	0.035
	$acas1_2_3$	15214.28	0.312701452	10.104	0.035
	$acas10_1_2$	24694.6	22.5715036	9.578	0.004
	acas10_3_2	24862.17	0.22926577	9.571	0.004
	$acas60_1_2$	23694.95	25.7809244	9.653	0.002
	acas60_2_3	23195.33333	25.89304822	9.646	0.002
	testacas60_2	23947.46667	-19.03005267	9.612	0.002
	acas120_1_2	22254.13333	26.38780926	9.691	0.001
	acas120_2_2	22630.99167	25.92035856	9.673	0.001
tct002	acas10_1_2	3162.747	21.03224772	11.81	0.024
	acas10_3_2	2852.329	-0.680129245	11.922	0.034
	acas60_2_3	3381.28	24.23040055	11.737	0.01
	$acas120_{-}1_{-}2$	3439.913333	24.56536	11.719	0.007
tct003	acas10_1_2	1022.23	20.64887589	13.036	0.069
	acas60_2_3	882.7783333	24.07056338	13.195	0.038
	$acas120_1_2$	755.90375	24.47466778	13.364	0.03
tct004	acas60_1_2	938.3466667	24.45131126	13.129	0.036
	acas60_2_3	945.7075	24.31557845	13.121	0.035
	acas120_1_2	885.71	24.71207793	13.192	0.026
	acas120_2_2	836.835	24.45488435	13.253	0.028
tct005	acas10_1_2	666.1622	21.50382286	13.501	0.106
	$acas60_1_2$	826.5598333	24.44875521	13.267	0.041
	acas60_2_3	758.4196667	24.56812428	13.36	0.045
	acas120_1_2	772.7704167	24.89852195	13.34	0.031
	$acas120_2_2$	735.8900833	24.52103194	13.393	0.032
tct006	acas60_1_2	688.4346667	24.30698248	13.465	0.048
	acas60_2_3	738.0216667	24.41608099	13.39	0.047
	acas120_2_2	637.7918333	24.33507115	13.548	0.035
tct007	acas60_1_2	990.8186667	24.86294887	13.07	0.034
	testacas60_2	1074.5605	0.327130044	12.982	0.044
	acas120_2_2	924.2983333	24.97006902	13.415	0.026

Table 3: 測光データ。phot での出力による。等級原点は 20.56 等とした。

このとき、測光データで等級が修正を受け、20.56 - 19.82 = 0.74[mag] ずつ全ての値が小さくなる。このとき、catalog にある等級との差は次のようになる。

	V等級	測光等級の平均	ずれの平均
a Cas	2.20	2.24	+0.04
tct001	8.98	8.99	+0.01
tct002	11.01	11.06	+0.05
tct007	12.14	12.42	+0.28

若干暗めに測光される傾向はあるものの、十分な精度で等級を測ることができることが分かった。暗い星については暗くなるほどより等級が大きく測光されることが分かる。また、a Cas については少しだけ誤差が大きくなっているが、これは星像が広がっているのに対して aperture が小さめである影響も大きいように思われる。厳密に等級原点を決定したければ最少自乗法などで求められるが、frame ごとの積分時間や sky の違いを考慮しなければならず、完全に求めることは困難である。

なお、前回の観測と比べて等級原点は明るいほうに修正された。これは、1秒間の露出で1カウ ントの信号を生じさせるのにより明るい天体が必要となったということであるから、カメラシステ ムの効率は悪くなったと考えることもできる。しかし、今回は aperture を半分以下にしているので、 その影響が最も大きかったと考えるのが妥当だろう(観測ごとに aperture を変えるのが好ましくな いことであることが明瞭である)。

4.5.2 ピクセルスケール

これまで、昨年度レポートの値 0.27[arcsec/pix] を用いてきたが、今回の観測結果からこの値を検証 する。できるだけ誤差の影響を小さくするために、acas120_2_2の測光天体のうち最も離れた 2 天体、 tct004 と tct007 の離角を測定することにする。

まず、aladin sky atlas で離角を調べると、有効数字 2 ケタで 7.7' であった。これに対応するピク セル上の距離は、phot データによると有効数字 3 ケタで 1.69×10^3 [pix] であった。したがって、ピ クセルスケールは、

$$7.7 \cdot 60[\operatorname{arcsec}]/(1.69 \times 10^3) = 0.27[\operatorname{arcsec/pix}]$$
(35)

である。つまり、昨年度の数値が妥当であるという結果が得られた。

4.5.3 システム効率

観測条件が異なるので、システム効率も異なるかもしれない。同じ式を用いて、V 等級のわかっている4天体の測光データについてシステム効率を求めた。計算式は

$$\eta = \frac{[\text{count/s}] \cdot 0.947}{1.487 \times 10^{9-0.4m}} \tag{36}$$

である。その結果、平均値は $\eta = 0.052$ [e⁻/photons]、標準偏差は0.0074であった。以降、第2回観測についてはこの値をシステム効率として用いる。

システム効率の値は第1回観測と比べて半分程度に減少してしまった。この原因は不明であるが、 sky カウントが大きめであること、第1回の aperture が大きすぎた (?) ことが原因として考えられる。

4.5.4 sky

S/N および限界等級を新たに計算するため、また sky 引きによってどれほど測光に影響があるのか を見るために sky について検討する。

sky の値は積分時間におおむね依存し、また frame 同士の引き算によって sky 引きを行った場合 も違う値をとる傾向が見られるので、それぞれを分けて frame についての平均と標準偏差を求めた。

	平均 [count/s/pix]	標準偏差
1sec	43.26	49.88
10sec	21.44	0.8320
60sec	24.67	0.6122
120sec	24.92	0.6866
sky 引き 10sec	-0.2254	0.6430
sky 引き 60sec	-9.351	13.69

まず sky 引きを行わない場合について、この結果から、積分時間が 10sec 以上では sky はある程 度の値に落ち着くことが分かる。このことは、bias の sin ゆらぎが積分時間を増やすことによって見 えなくなることと関連し、bias+dark をある程度の精度で除けるようになったことにより sky 固有の 値が分かるようになったものと思われる。1sec の sky は値のばらつきが大きすぎるため、S/N の計 算は考えない。10sec から 120sec にかけて sky カウントが若干増えていっているのが気にかかるが、 sky が時間的に比例以上で増えることは考えにくいので、カメラシステムに原因があると考えられる。 dark frame がなんらかの原因となっている可能性が高いと思われるが、今回は追及しなかった。本 来はこの平均値を frame から引いてしまうリダクションを行うべきではあるが、phot タスクでの測 光によって sky の推定値が引かれてしまうため、測光にはそれほど影響を与えないと考え放置した。

この場合についての背景光を数値化したい。参照値として、今回は 60sec の値 24.7[count/s/pix] を使用した。前セクションとまったく同様の計算によって n_{sky} を求める (n_{dark} は無視できるものと 考える)。

$$n_{sky} = 24.7 \times 0.947 = 23.4 [e^{-}/s/pix]$$
 (37)

 $s_{sky} = \frac{23.4}{0.052 \cdot 0.0729} = 6.2 \times 10^3 [\text{photons/s/arcsec}^2]$ (38)

$$m_{sky} = 19.82 - 2.5 \cdot \log\left(\frac{24.7}{0.0729}\right) = 13.5[\text{mag/arcsec}^2]$$
 (39)

当然、第1回観測よりも値が大きくなっていることが分かる。

次に、syk引きを行った場合について考える。sky引きは、dark+skyが(時間変化がないと仮定 すれば)一挙に引けてしまうので便利な方法である。結果を見れば、たしかに背景光を引くことがで きていることが分かる。ただし、60secでは標準偏差が大きくなってしまった。これは天体位置ごと の誤差が大きいことを意味するが、星像が入るような局所領域内では変化は小さいと考えられるの で、phot での測光には悪影響はないと思われる。

今回は、楽観的に考えてこの場合の sky カウントを無視できると仮定して計算を行った。つまり、 このとき $n_{sky} = 0$ である。

4.5.5 S/N

ここでは、まず V 等級のわかっている星 tct001、tct002 および tct007 について積分時間の関数としての *S*/*N* の理論値を求め、測光データと比較する。

• S/N の測定値

phot タスクでは 1 σ での等級誤差を求めるので、その値から S/N を求めることができる。測 光等級 m の天体の等級誤差が Δm であるとすると、この天体からの flux: f_{ν} とその誤差は、

$$f_{\nu} = A10^{-0.4m} \tag{40}$$

$$f_{\nu} + \Delta_1 = A 10^{-0.4(m - \Delta m)} \tag{41}$$

$$f_{\nu} - \Delta_2 = A10^{-0.4(m + \Delta m)} \tag{42}$$

(43)

とかける。したがって S/N は、

$$S/N = \frac{f_{\nu}}{(\delta_1 + \delta_2)/2} = \frac{2}{10^{0.4\Delta m} - 10^{-0.4\Delta m}}$$
(44)

と計算できる。

S/*N*の計算値 *S*/*N*の計算式を再掲する。

$$S/N = \frac{\eta s_i t}{\sqrt{\eta s_i t + m n_{bg} t + m N_{read}^2}} \tag{45}$$

これに次にまとめた値を代入する。

n	0.052
'/	0.002
s_i	$1.487 \times 10^{(9-0.4m)}$
m	1257
$n_{bg}(sky 引きなし)$	23.4
$n_{bg}(sky 引きあり)$	0
N_{read}	12

これにより、S/N は次のような等級 m と積分時間 t の関数となる (sky 引きなしとした)。

$$S/N = \frac{7.73 \times 10^7 \cdot 10^{-0.4m} \cdot t}{\sqrt{7.73 \times 10^7 \cdot 10^{-0.4m} \cdot t + 2.94 \times 10^4 \cdot t + 1.81 \times 10^5}}$$
(46)

この二つを比較してグラフ化した (Figure 21)。このグラフによれば、確かに *m* と *t* に対する *S/N* の特性が計算通りに現れていることが分かる。ただし、計算値と理論値のずれは非常に大きい。

ここで、sky 引きを行った frame の S/N の値について考える。式 (44) からわかるように、S/N の測定値は等級誤差の出力だけで決定できる。等級誤差 Δm が大きいほど S/N は小さくなる。しかし、Table 3 で同じ天体についての sky 引きを行った frame と行っていない frame での Δm を比較すると、等しいか大きくなっていることが分かる。つまり、sky 引きを行った frame でも S/N は向



Figure 21: S/N の計算値と理論値の比較。t = 120, 60, 10 とし、等級のわかっている 3 天体につい て S/N を等級 m の関数として表した。

上していないのである。計算によると、 $n_{bg} = 0$ と見ることができる分 S/N は向上するべきである が、これは確認できないという残念な結果が得られた。

原因として考えられるのは、sky 引きでは sky のポアソンノイズは除去できないということである。ポアソン分布の計算によればポアソン分布の足し引きによってはノイズは減少しない。そのために、S/N の計算においては $n_{bg} = 0$ とすることができず、S/N は変化しなかったと推測できる。もっとも、今回はサンプル数が少なかったため有意な差が確認できなかっただけかもしれない。

次に、理論値と観測値の誤差について考える。積分時間が短い t = 10[sec] では他の積分時間より も理論値と観測値の誤差が小さくなっている。式 (46)の各項でもっとも誤差が生じやすいのは明ら かに n_{bg} の値であり、これには t がかけられているので積分時間が長くなるほど誤差が蓄積して大き くなったという仮説を立てることができる。

まず考えられるのは、n_{dark} = 0 として無視した暗電流のポアソンノイズである。この値をフィッ ティングによって求めることも考えたが、サンプル数が少ないうえに誤差の方向もばらばらであり、 うまくいかなかった。

そこで、サンプル数を増やすために1秒積分以外のすべての測光データをグラフと比較する。等級のわからない星もあるが、等級原点はおおむね十分な精度で決定できていると仮定し、全てのデータについて横軸を測光等級、縦軸を *S*/*N* として計算値と比較する (Figure 22)。



Figure 22: 横軸は測光等級 [mag]、縦軸は S/N。右は左のグラフを拡大したもの。

このグラフを見れば、それぞれの積分時間ごとに緩やかな法則性をもって測定値と計算値のずれ が生じていることが分かる。ここで、gnuplotのフィッティング機能を用いて S/N の式を修正する。 具体的には、 n_{bg} の値が最も怪しいのでこれを変数とすることにする。t = 10,60,120 それぞれにつ いての mn_{bg} を a, b, c とおくと、

$$a = 2.87 \times 10^4 (\pm 1.1 \times 10^3) \tag{47}$$

$$b = 6.86 \times 10^4 (\pm 2.8 \times 10^3) \tag{48}$$

$$c = 2.18 \times 10^4 (\pm 1.3 \times 10^3) \tag{49}$$

(50)

これらから nbg の値を求めると、

$$n_{bg,a} = 22[e^{-}/s/pix]$$
(51)

$$n_{bg,b} = 54[e^{-}/s/pix]$$
 (52)
 $17[e^{-}/s/pix]$ (52)

$$c_{bg,c} = 17[\mathrm{e}^{-}/\mathrm{s}/\mathrm{pix}]$$
(53)

(54)

となり、積分時間によるばらつきが非常に大きい結果となってしまった。したがって、このように S/N から逆に sky カウントを推定するのは失敗した。S/N の計算には複雑な因子が絡んでおり、こ れを適切に推定するのは非常に難しそうである。今回は行わなかったが、システム効率や読み出しノ イズの計算も見直してみるべきかもしれない。ともあれ、等級と積分時間に対する大まかな応答は計 算通りの傾向を示すことが確認できた。

4.5.6 限界等級

式 (46) について、S/N = 10 を代入し *m* について解くことで積分時間 *t* の関数としての限界等級を 求めることができる。第1回観測と比較するために t = 10 として計算する。

$$m(t = 10) = -2.5 \log(8.98 \times 10^{-6}) = 12.6 [\text{mag}]$$
(55)

第1回観測での値 12.5[mag] とはそれほど変わらない結果となった。この値に最も近いのは acas10_1_2 の tct005 で、推定等級 12.8[mag]、S/N = 10.2 であったから、おおむね想定通りに暗い星まで見え ていることが分かる。この限界等級を t の関数として見たときの関数形は、

$$m(t) = -2.5 \log \left(\frac{3.87 \times 10^9 \cdot t + \sqrt{1.49 \times 10^{19} \cdot t^2 + 1.76 \times 10^{22} \cdot t^3 + 1.08 \times 10^{23} \cdot t^2}}{5.98 \times 10^{15} \cdot t^2} \right)$$
(56)

である。このグラフは Figure 23 のようになる。

なお、積分時間が 60[sec]、120[sec] それぞれでの限界等級は、

$$m(t = 60) = 13.8[\text{mag}]$$
 (57)

$$m(t = 129) = 14.2[mag]$$
 (58)

(59)

となった。東京の空であっても、観測条件さえ整えばそれなりに暗い星まで検出可能であることが確認できた。



Figure 23: *S*/*N* = 10 を与える、積分時間に対する限界等級のグラフ。

5 簡単な考察

考察というよりは反省に近いかもしれないが、今回の観測について気が付いた点を挙げる。

 第1回と第2回測定値の比較 結局、カメラシステムの性能について得られた値は次のようになった。

	第1回	第2回
η	0.107	0.052
Z_{mag}	20.6	19.8
n_{bg}	15.6	23.4
m(限界等級)	12.5	12.6

システム効率など、カメラの性能に関わるファクターでは基本的に第1回観測の方が値が良い が、限界等級の値としてはそれほど変わらないという結果になった。このことは、そもそも sky などのコンディションの差、リダクション方法の違いがあるため一概に比較することはできな い。リダクション方法が第1回と第2回で変わってしまったのは反省すべき点である。このこ とで単純比較を難しくした面がある。また、測光した天体の等級も大きく異なる。これによっ て、sky の影響が変わるという影響も考えられる。

リダクション方法の S/N への影響

まず一つ得られた知見は、frameの引き算を行って sky 引きをした場合でも S/N が向上するこ とはないという点であろう。これはポアソンノイズの計算から明らかかもしれないが、観測前 の直感的な予測とは違う点だった。ただ、今回は bias+dark のゆらぎ除去や、flat frame の取 得においてかなり手順を簡単化した面がある。したがって、こうした手順の S/N の影響につ いてはよく分からなかった。積分時間が短いと sin ゆらぎの影響を受けやすいという傾向はあ るので、それについて何らかの対策をとればよかったと何度も思った。実習前に過去のレポー トを一通り読んでおくべきだったと何度か後悔したので、来年以降実習を受ける方にはリダク ションなどについて一通り目を通しておくことを強くお勧めする。

S/*N* の計算

Figure 22 からわかるように、S/N の計算値と実測値の間には一見してわかる誤差が残ってし まった。フィッティングによって全てのデータ点に当てはまるようなパラメータを見つけるこ とができなかったため、今回はこれについてはあきらめざるを得なかった。前述したように、 sky カウントだけでなく全てシステム効率や読み出しノイズについても見直しをするべきであ るように思った。

6 最後に

初めて本格的な望遠鏡にじかに触れる機会を得ることができ、非常に楽しい実習となりました。 普段は机の上で PC を使っている場面が多いですが、実際に星を見上げながら望遠鏡の操作に ついて試行錯誤するのは新鮮な体験でした。このレポートは、かなり大雑把な議論に頼る部分 も多く、過去のレポートを見ると自分の勉強不足を実感しました。特に統計学は、よく確認し てみないとおかしな議論をしているかもしれません。

本原先生には、6回にもわたる実習に夜遅くまでつきあっていただき、いろいろなアドバイス をいただいたりして本当にお世話になりました。ありがとうございました。