

基礎天文学観測 I・II

小望遠鏡による基礎観測実習

3年 62007D

神谷 保臣

1 目的

30cm カセグレン望遠鏡を用い、CCD カメラによる基本的な天体観測を行う。望遠鏡の基本操作、天体観測の基本事項、及び CCD 観測の基本技術の習得を目指す。2005 年度と同様に、「観測から望遠鏡/カメラシステムのシステム効率を出す」、「限界等級を算出する」、「実際に観測を行って、その限界等級が得られるかを調べる」の3点を行う。

2 概念

ここでは、観測に際して必要な概念の解説をする。

2.1 システム効率

システム効率とは、単純に言えば、望遠鏡に入射した星からの光子のうち、CCD で電荷となって読み出されたものの割合のことである。システム効率を η 、望遠鏡に入射した星からの光子数を s_i [個/s]、CCD で生じた電荷の個数を n_i [e⁻/s] とおくと、

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (1)$$

となる。

ここで、望遠鏡の口径を D [cm]、天体からのフラックスを F_λ [W/cm²/μm]、フィルタの波長範囲を $\Delta\lambda$ [μm]、フィルタの中心波長を λ [μm] とおくと、 s_i は、

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

で表される。ここで、 π は円周率、 h はプランク定数、 c は光速である。仮に、天体の V 等級を V [mag] とすると、

$$V = -2.5 \log \left(\frac{F_\lambda}{F_V^0} \right)$$

$$\Leftrightarrow F_\lambda = F_V^0 \times 10^{-V/2.5}$$

となる。ここで、 F_V^0 は V バンドの 0 等級のフラックスである。従って、(2) 式より、

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_V^0 \times 10^{-V/2.5}}{hc/\lambda} \quad (3)$$

となる。各定数の値は、 $\pi = 3.14$ 、 $D = 30$ [cm]、 $F_V^0 = 3.92 \times 10^{-12}$ [W/cm²/μm]、 $h = 6.62 \times 10^{-34}$ [J·s]、 $c = 3.00 \times 10^8$ [m/s] である。

また、 N [ADU] を画像上でのカウント、 f_{conv} [e⁻/ADU] をコンバージョンファクター（1 カウントが何個の電子に相当するか）、 t [s] を積分時間とすると、 n_i は、

$$n_i = \frac{N f_{\text{conv}}}{t} \quad (4)$$

と表される。今回は $f_{\text{conv}} = 3.8$ [e⁻/ADU] である。

2.2 S/N 比

S/N 比とは、ノイズに対して信号がどの程度来ているかを表す。 ρ を S/N 比、 N_{noise} [e⁻] をノイズ成分とすると、

$$\rho = \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \quad (5)$$

又は、(1) 式より、

$$\rho = \frac{\eta s_i t}{N_{\text{noise}}} \quad (6)$$

となる。

ノイズ成分 N_{noise} は、入射光子のポワソンノイズと検出器からの読み出しノイズでほぼ占められている。素子数を m [pix]、単素子当りに検出された背景放射の光子数を n_{sky} [e⁻/s/pix]、検出器の単素子当たりの暗電流を n_{dark} [e⁻/s/pix]、検出器からの単素子当たりの読み出しノイズを n_{read} [e⁻ r.m.s./pix] とおくと、 N_{noise} は、

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + m \{(n_{\text{sky}} + n_{\text{dark}}) t + n_{\text{read}}^2\}} \quad (7)$$

又は、(1) 式から、

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

となる。

2.3 限界等級

限界等級 V_{lim} は、その名の通り、検出可能な最も（ここでは）明るい等級のことである。等級が既知の比較的明るい星を観測して η や n_{sky} を求め、 t と ρ を適当に決めた上で、(1) ~ (8) 式を駆使して V について解けば、 V_{lim} が得られる。当然のことながら、 t や ρ が異なれば V_{lim} も異なる。

3 装置

ここでは、観測に使用した装置について説明する。

3.1 望遠鏡

望遠鏡はカセグレン式反射望遠鏡（図 1*¹）を用いた。その主な仕様は、口径が 300 mm、焦点距離が 5000 mm (F16.7)、プレートスケールが 41 arcsec/mm である。ガイド望遠鏡、ファインダー望遠鏡がそれぞれ 2 つずつ付属している。

架台は、ニコン製ドイツ式赤道儀である。

*¹ <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kmotohara/30cm/>より無断拝借。



図 1 使用した望遠鏡。

3.2 CCD カメラ

カメラ本体(図 2^{*2})は Spectra Source Instruments 社の MCD-1000 で ,中の CCD は SITE 社の SI-502AB という裏面照射 CCD である。CCD の仕様は表 1 の通りである。

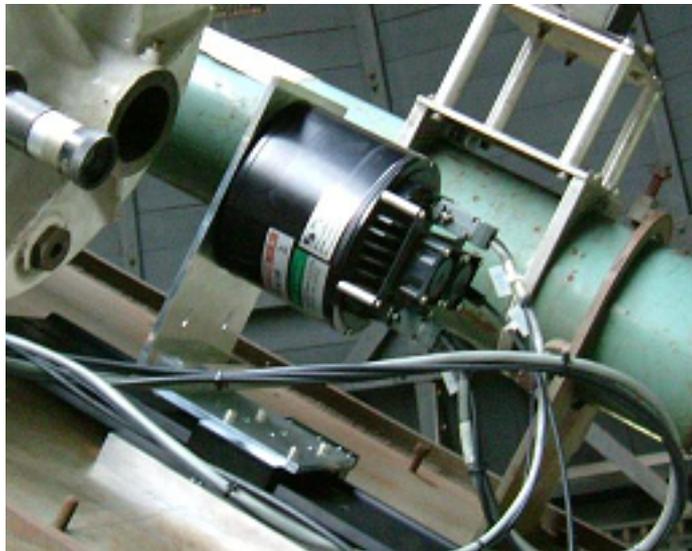


図 2 望遠鏡に設置されたカメラ。

^{*2} <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kmotohara/30cm/>より無断拝借。

表1 CCDカメラの各パラメータ。

フォーマット	512 × 512
アレイサイズ	12.3 mm × 12.3 mm
ピクセルサイズ	24 μm × 24μm
Full Well	250000 e ⁻ /pix
読み出しノイズ	<10 e ⁻ (180 K) 32.3 e ⁻ (261 K) ^(†) = n_{read}
暗電流	0.0046 e ⁻ /sec/pix (160 K) 12.75 e ⁻ /sec/pix (240 K) 9 e ⁻ /sec/pix (261 K) ^(†) = n_{dark}
量子効率	68 % (450 nm) 75 % (550 nm) 80 % (650 nm)
CTE	0.99999
出力数	2
ピクセルスケール	0.99 "/pix ^(‡)
視野	8.45 ' × 8.45 ' ^(‡)

(†) は現ハワイ観測所の表さんが実測した値であり, (‡) は望遠鏡に取り付けたときの値である。

3.3 フィルタ

標準のフィルタシステムのフィルタは高価な特注品なので, 市販されている駿河精機の青緑透過フィルタ S76-VG6 と赤外線カットフィルタ S76-KG5-1 を 2 枚重ねて, V バンドのフィルタの代用とする。市販フィルタと代用フィルタの透過率を表したのが図 3^{*3}である。フィルタのデータから, 波長範囲は

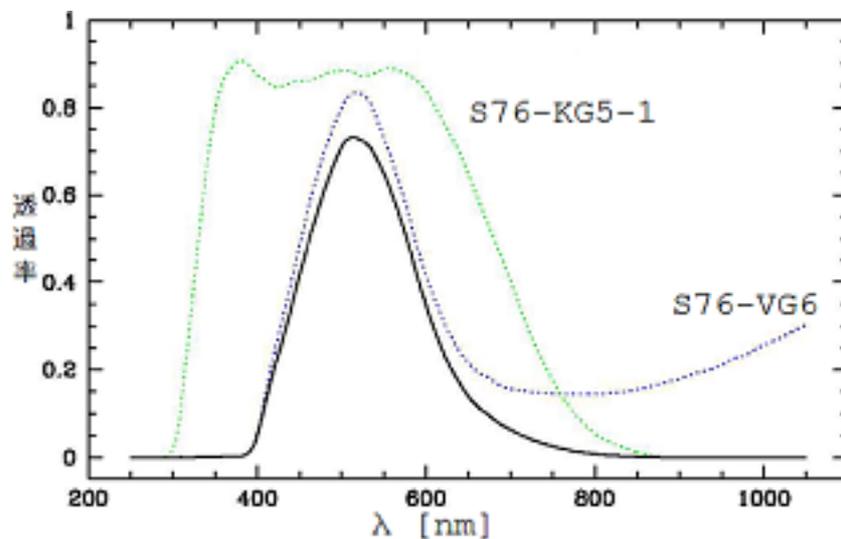


図3 フィルタの透過率。市販フィルタの透過率を掛け合わせて代用フィルタの透過率とした。

*3 データは天文センターの PC で処理して $\Delta\lambda$ と λ を求めておいたのだが, 肝心のグラフを作るのを忘れていたのに加え, 外部から HP のリンク経由でデータファイルにアクセス出来ない(ユーザー名とパスワードが実習のときに教えてもらったのとは違う)ため,(アクセスできる)一昨年度の先輩のレポート中のグラフを無断拝借し, 更に無断改変した。

$\Delta\lambda = 154 \text{ [nm]} = 0.154 \text{ [\mu m]}$, 中心波長は $\lambda = 514 \text{ [nm]} = 5.14 \times 10^{-9} \text{ [m]}$ であることが分かった。

4 観測

ここでは、観測の様子や得られたデータ、データ解析を述べる。尚、使用したコマンドに関する解説は割愛した。

4.1 2006年12月1日(金): 説明会・観測

実習について一通りの説明を受けた後、そのまま1回目の観測に突入した。幸いにも薄曇りながら何とか観測が出来る天気であった……が、まさか観測するとは思っていなかったので防寒対策が不十分で、後々でダメージを受けることになった。ドーム内を見学したり CCD カメラのスイッチを入れたりした後、実験室に向かい、PC(ioa10) で xplns を用いて、各自が観測する(予定の)星を選んだ。私が選んだのは表2にある通りである。もっとも、3人一緒の対象でも良いという流れになって、結局は表3の星になった。

表2 私が観測する予定だった星。

名前	位置 (J2000) ^(†)			V 等級 ^(†)
	赤経	赤緯		
54 λ Cyg	20 ^h 47 ^m 24.5 ^s	+36° 29' 27"		4.53
44 Cyg	20 ^h 30 ^m 59.2 ^s	+36° 56' 9"		6.19

^(†) http://www.alcyone.de/sit/SIT_main_en.htm にある the Bright Star Catalogue, 5th Revised Ed.(Preliminary Version) (Hoffleit+, 1991) を参照した。

表3 実際に観測した星。

名前	位置 ^(†)		V 等級 ^(†)
	赤経	赤緯	
(Cas 内の星)	0 ^h 56.8 ^m	+60° 22'	5.6
26 ν 1 Cas	0 ^h 55.0 ^m	+58° 58'	4.8
28 ν 2 Cas	0 ^h 56.6 ^m	+59° 11'	4.6

^(†) の各データは xplns で表示されたものである。

そうして星を決めた後、望遠鏡や CCD カメラの操作や調整のため、 γ Cyg と思われる^{*4}明るい星を対象にして様子を見た。CCD カメラの情報は.FTS で出てくるので、これを IRAF で扱えるようにドーム内の PC(golf) で.fits に変更した。そうして IRAF で調べたピークの統計が表4である。

今度はフォーカスを調節するために、対象を明るいツィー (27 γ Cas) にして様子を見た。先程と同様に IRAF で調べた結果が表5である。

こうしてフォーカスを決定した後、表3にある3つの星を観測するとともに、バイアス (bias01, bias02, bias03) とダーク (dark01, dark02, ..., dark07)^{*5}, フラット (flat01) も撮った(表6)。

^{*4} 手元の記録には「デネブの1個下の星」とだけ書かれているため、望遠鏡を向けていない私には断定は出来ない。

^{*5} 各データの積分時間は、01 が不明、02 と 03 が 0.5s, 04 と 05 が 1.0s, 06 と 07 が 2.0s である。

表 4 γ Cyg (と思われる星) を対象にした観測結果。

ファイル名	t [s]	MOFFAT [pix]	備考
test	5	-	
test02	5	3.6	
test03	5	4.0	
test04	5	4.8	
test05	5	5.28	
test06	5	-	
test07	5	14.5	
test08	5	6.19	
test09	-	-	ファインダーがずれていたため失敗。

表 5 ツイー (27 γ Cas) を対象にした観測結果。

ファイル名	t [s]	MOFFAT [pix]	フォーカス [cm]	備考
test10	5	-	-	積分時間が長過ぎ。
test11	0.1	3.48	-1.0	
test12	0.1	3.78	-1.5	
test13	0.1	3.26	0.0	
test14	0.05	3.06	0.5	
test15	0.05	2.25	0.5	
test16	0.05	3.28	1.0	
test17	0.05	5.69	0.5	これに決定。

表 6 表 3 の 3 つの星とダーク。

対象	ファイル名	t [s]	備考
26 ν Cas	cas26, cas26_4, cas26_5	0.5	毎回星の位置は同じ。
	cas26_1, cas26_2, cas26_3	1.0	毎回星の位置は同じ。
28 ν Cas	cas28_1, cas28_2, cas28_3	0.5	毎回星の位置は同じ。
	cas28_4, cas28_5	1.0	毎回星の位置は同じ。
	cas28_6, cas28_7	1.0	毎回星の位置は異なる。
(Cas 内の星)	cas, cas_1, cas_2, cas_3	1.0	毎回星の位置は異なる。
	cas_4, cas_5, cas_6	2.0	毎回星の位置は異なる。
	dark01	-	
	dark02, dark03	0.5	
	dark04, dark05	1.0	
	dark06, dark07	2.0	

4.2 2006 年 12 月 8 日 (金): 解析

観測出来ない天気のため、前回のデータの解析を行った。まず観測されたフラックスを求める準備として、IRAF で imarith によって、 t が同じで星の位置が異なる 2 枚を引いて、各星 2 枚ずつファイルを作った。実際には、cas28_5_7 (\Leftarrow cas28_5 - cas28_7) と、cas_1_2 (\Leftarrow cas_1 - cas_2) 及び cas_4_5 (\Leftarrow cas_4 - cas_5) を作った。ところが、表 6 にもあるように、星の位置が同じものもあるので、その場

合はバイアスを引くことにし, cas26_4b (\Leftarrow cas26_4 - bias01) 及び cas26_3b (\Leftarrow cas26_3 - bias01) と, cas28_3b (\Leftarrow cas28_3 - bias01) を作った。本来ならば 1 次処理として, ダーク等の平均を作ったり, 平均フラットで割ったりと, 幾つもの操作が必要ではあるが, 今回は割愛して良いことになったので, そのまま imexam で解析をした。その結果を表 7 に示す。更に, n_{sky} を出すために, cas_4d (\Leftarrow cas_4 - dark06; $t = 2.0$ [s]) を作り, 背景の部分で適当に 5 箇所を調べて N_{sky} を出したところ, 512 ADU と 530 ADU, 494 ADU, 500 ADU, 526 ADU であった。これを平均して 512.4 ADU となり, (4) 式から $n_{\text{sky}} = 974$ [e^- /s/pix] と求めた。

表 7 解析結果。

ファイル名	t [s]	N [ADU]	$R = \sqrt{m/\pi}$ [pix]
cas_1_2	1.0	170853	11.87
cas_4_5	2.0	294233	12.36
cas26_3b	1.0	332510	11.35
cas26_4b	0.5	167345	12.89
cas28_3b	0.5	213160	11.96
cas28_5_7	1.0	435895	12.23

このまま一気に n_i を求めようとしたが, 遅い時間になってしまったのでここまでとなった。

4.3 2006 年 12 月 15 日 (金): 解析

この日は本郷にいるときは晴れていたが, 三鷹に向かうとどんどん曇ってしまい, 結局観測は出来ず仕舞いだった。2 回連続の解析となった。

前に述べて幾つかの式を使って η を求めたところ (表 8), (平均で) 0.0976, つまり 9.76 % となった。これが良い数字なのか, 比較材料が無いので何とも言い難いが, 一昨年の実習では約 7 % であったらしいので, それよりは良い数字が出たのではなかろうか。

表 8 効率の計算結果。

星	V [mag]	F_λ [$\text{W}/\text{cm}^{-2}/\mu\text{m}$]	s_i [個/s]	N [e^-]	t [s]	n_i [e^- /s]	η
(Cas 内の星)	5.6	$10^{-2.24} F_V^0$	6.35×10^6	170835	1.0	649241.4	0.102
				294233	2.0	559042.7	0.0880
26 v Cas	4.8	$10^{-1.92} F_V^0$	1.33×10^7	167345	0.5	1271822	0.0956
				352510	1.0	1263538	0.0950
28 v Cas	4.6	$10^{-1.84} F_V^0$	1.60×10^7	213160	0.5	1620016	0.101
				435895	1.0	1656401	0.104

また, ついでに ρ も調べてみたところ, 表 9 の通りになった。当然のことながら, 比較的明るい星であるので, ρ の値は予想通り大きいことが分かった。

さて, V_{lim} を求めてみる。 m は対象や t によって幾らでも変化してしまうので, ここでは得られたデータの平均を取って, 461.2 pix とする。また, η も先程求めた平均値を用いることにする。(6) 式に (8) 式を代入して整理すると,

$$\eta^2 t^2 s_i^2 - \eta \rho^2 t s_i - m \rho^2 \{ (n_{\text{sky}} + n_{\text{dark}}) t + n_{\text{read}}^2 \} = 0$$

表 9 S/N 比の計算結果。

星	n_i [e ⁻ /s]	R [pix]	m [pix]	t [s]	N_{noise} [e ⁻]	ρ
(Cas 内の星)	649241.4	11.87	442.4	1.0	1243	522
	559042.7	12.36	479.7	2.0	1415	790
26 ν Cas	1271822	12.89	521.7	0.5	1199	530
	1263538	11.35	404.5	1.0	1443	876
28 ν Cas	1620016	11.96	449.2	0.5	1225	743
	1656401	12.23	469.7	1.0	1615	1026

となる。これを解くと ($s_i > 0$ より),

$$s_i = \frac{\rho}{2\eta t} \left[\rho + \sqrt{\rho^2 + 4m \{ (n_{\text{sky}} + n_{\text{dark}}) t + n_{\text{read}}^2 \}} \right]$$

と求まる。この s_i を (3) 式に代入して V について解けば, V が t と ρ の関数で表される。 $\rho > \rho_{\text{lim}}$ ならば検出出来たとすれば^{*6}, この ρ_{lim} のときの V が V_{lim} となる。異なる t や ρ_{lim} に対して V_{lim} を求めると表 10 のようになる。

表 10 V_{lim} の計算結果。

	$\rho = 5$	$\rho = 10$
$t = 5$ s	12.0 mag	11.7 mag
$t = 10$ s	12.4 mag	11.7 mag

V_{lim} が求まったところで, それを確認するための対象として 3 つの星を選んだ^{*7} (3 人とも同じ)(表 11)。もっとも, 幸いなことに, そのうち 1 つを撮っただけで事足りてしまったのだが.....。

表 11 限界等級を確かめるために観測しようとした星。

ID	赤径	赤緯	B1 等級	R1 等級	V 等級 ^(†)	目印となる星
1478-0036317	012.316948°	+57.800898°	10.25	10.09	10.17	η Cas
1301-0387070	305.432795°	+40.184675°	9.40	9.14	9.26	γ Cyg
1202-0547481	318.117612°	+30.229942°	11.45	10.88	11.165	ζ Cyg

(†) 以外の各データは the Aladin Sky Atlas に表示されたものである。

(†) では, V 等級は近似的に B1 等級と R1 等級の平均値とした。

4.4 2007 年 1 月 4 日 (木): 観測・解析

天気は晴れているものの, 薄曇りのようであったが, 何とか観測できた。

手始めに η Cas 近傍を撮った (表 12)。

^{*6} 通常, 光赤外では $\rho_{\text{lim}} = 5$ とする (らしい)。

^{*7} 探す際に, the Aladin Sky Atlas (<http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>) を参照した。

表 12 η Cas を観測した結果。

ファイル名	t [s]
etacas01, etacas02, ..., etacas05	5
etacas06, etacas07, etacas08	10
dark08	5
dark09	10
bias04, bias05	-

先日の観測のときと同様に IRAF を使って, imarith で cas0501 (\Leftarrow etacas05 – etacas01) と cas0806 (\Leftarrow etacas08 – etacas06) を作った。その画像をよくよく見てみると, 表 13 にある 2 つの星が偶然にも入っていた。これらの星を imexam で調べたところ, 表 14 のようになった。

表 13 η Cas と一緒に撮られた星。

ID	赤径	赤緯	B1 等級	R1 等級	V 等級 ^(†)
1478-0036317	012.316948°	+57.800898°	10.25	10.09	10.17
1478-0036522	012.401562°	+57.823234°	11.81	10.74	11.275

(†) 以外の各データは the Aladin Sky Atlas に表示されたものである。
 (†) では, V 等級は近似的に B1 等級と R1 等級の平均値とした。

表 14 η Cas 近傍の解析結果。

ファイル名	ID	t [s]	N [ADU]	R [pix]
cas0501	1478-0036317	5	11258	12.14
	1478-0036522	5	2203	7.62
cas0806	1478-0036317	10	18843	15.17
	1478-0036522	10	6776	10.49

この 2 つの星について効率と S/N 比を計算したところ, 表 15 のようになった。但し, n_{sky} は N_{sky} の記録を取り忘れたため, 前回と同じ値とした。 n_{sky} が正しくはないので結果を信用して良いのか微妙なところだ

表 15 効率と S/N 比の計算結果。

ID	V [mag]	F_{λ} [W/cm ² /μm]	s_i [個/s]	N [e ⁻]	t [s]	n_i [e ⁻ /s]	η
1478-0036317	10.17	$10^{-4.068} F_V^0$	9.44×10^4	11258	5	8.56×10^3	0.0907
				18843	10	7.16×10^3	0.0758
1478-0036522	11.275	$10^{-4.51} F_V^0$	3.41×10^4	2203	5	1.67×10^3	0.0490
				6776	10	2.57×10^3	0.0754

ID	n_i [e ⁻ /s]	R [pix]	m [pix]	t [s]	N_{noise} [e ⁻]	ρ
1478-0036317	8.56×10^3	12.14	462.8	5	1.67×10^3	25.6
	7.16×10^3	15.17	722.6	10	2.82×10^3	25.4
1478-0036522	1.67×10^3	7.62	182.3	5	1.05×10^3	7.95
	2.57×10^3	10.49	345.5	10	1.94×10^3	13.2

が、2つの星とも異なる積分時間で検出出来たと言える。つまり、限界等級が得られたことになる。
更に、この2つの星の4枚の画像について apphot で測光したところ、表 16 のような値が得られた。

表 16 測光結果。

ID	FLUX [counts]= N [ADU]	MERR [mag]≡ M_{err}	ファイル名
1478-0036317	13104.73	0.062	cas0501
	18423.73	0.075	cas0806
1478-0036522	2167.01	0.214	cas0501
	7294.375	0.126	cas0806

この M_{err} を用いて、

$$\rho \sim \frac{F_{\lambda}(V=M)}{|F_{\lambda}(V=M \pm M_{\text{err}}) - F_{\lambda}|} = \frac{1}{|10^{-M_{\text{err}}/2.5} - 1|}$$

となる(らしい)ので、これを使って S/N 比を求めると表 17 となる。1478-0036522 の S/N 比が小さめなのは、それを観測した際の天気が比較的悪かったためと考えられる。

表 17 M_{err} から求まる S/N 比。

ID	MERR [mag]≡ M_{err}	ρ	ファイル名
1478-0036317	0.062	18.0	cas0501
	0.075	15.0	cas0806
1478-0036522	0.214	5.59	cas0501
	0.126	9.13	cas0806

また、 η を最初に出した平均値として、表 16 の値から逆に V を求めると、表の上から順に 1478-0036317 が 10.09 と 10.40 (平均 10.25)、1478-0036522 が 12.04 と 11.47 (平均 11.76) になった。どちらも微妙にデータよりも大きいですが、これは天気が大きく影響しているものと思われる。

5 感想

何よりもまず、これ程までに天候に左右されるものか、と実感した。他の観測実習でも天候が悪くて待たねばならなかったことはあったが、この実習では曇ってしまったときに一番悔しい思いをした気がする。

IRAF を使ったり 1 次処理をしたりするのは初めてではなかったものの、Unix(Linux) 環境にまだまだ不慣れなせいか、PC 操作ではかなり手間取ってしまった。また、IRAF で解析しているものの、今一自分が何をしているか・何が得られたのかがはっきりしないままやっていたので、理解するまでに時間を要してしまった。特に測光に関しては初めてであったこともあり、このレポートを書きながらも頭の中には疑問符が浮かんだままである。弾き出されたデータを見れば大外れではないようだが……。このレポートが後輩に読まれるのに堪えるものだとはい到底思えないが、レポートを纏めていくうちに実習でやったことが自分なりに噛み砕くことが出来たと思う。

寒い中、ありがとうございました。