

和歌山大学教育学部天文台CCDカメラの性能評価

Photometric characteristics of CCD cameras equipped at astronomical observatory
of Faculty of Education, Wakayama University

富田 晃彦

Akihiko TOMITA

(和歌山大学教育学部)

2011年8月22日受理

Abstract

Photometric characteristics of the CCD cameras, equipped on the 60cm reflector of the astronomical observatory, Faculty of Education, Wakayama University, are presented. Read noise, gain, dark current were measured and deviation from values in the manual was found. Temperature dependence and time variation of the dark current, and input-output linearity of the CCD were also investigated.

Key words : astronomical observatory, astronomical instruments, CCD camera

1. はじめに

はやぶさのサンプル・リターンや、隕石採取、ニュートリノの捕獲などの特殊な例を除き、天文学の研究では、直接、天体のサンプルを手に行うことができないという厳しい条件が課されている。そのため、天体からの電磁波放射の観測は、天文学の研究の方法として大変重要なものになっている。電磁波の中で可視光域は、恒星からの放射(温度が数千度から数万度の、ほぼ黒体で近似できる放射)が卓越する波長域であり、そのために、恒星の集合体としての宇宙の姿を知る窓になっている。幸いなことに地球大気は、可視光域に対し、よく透過させる波長特性を持っている。おかげで我々は恒星の一つである太陽からの放射を十分享受でき、また地上観測(大気圏外観測と対比させての表現)で可視光域の観測ができるのである。

さて、可視光域での観測を支えるのは、望遠鏡とCCDカメラである。望遠鏡については、富田(2011)で概略を紹介した。この論文では、CCDカメラについて、その測光特性をまとめる。和歌山大学教育学部天文学ゼミの卒業研究として、CCDカメラの測光特性の研究が続けられてきた。特に、2002年度の西端一憲、2005年度の山口卓也、2010年度の尾崎香織の3編の卒業論文は、この課題に対して詳細に検討している。この論文はこれら3編の卒業研究でのデータをもとに、まとめなおしたものである。

2. CCDカメラ性能の独自測定

和歌山大学教育学部屋上天文台で使っているCCDカメラは、SBIG製のST-7E、ST-9E、STL-1001E

の3種類、それぞれ1台である。いずれもアンチ・ブルーミング・ゲートなし(NABG)、クラス1仕様のものである。この論文では、これらカメラについて調査した性能をまとめた。

CCDカメラの性能について、カタログや手引書に、製品仕様として書かれている項目がある。観測上重要なものを表1にまとめた。和歌山大学教育学部屋上天文台に設置された年(すべて新品購入なので、購入年と同じ)、口径60cm反射望遠鏡の焦点距離7800mmのカセグレン焦点に取り付けた時の、1画素に対する角度と、チップ全体の視野角も付記した。

表1のうち、網掛けをした3つの項目は、室内実験によって性能を精密に確認し直した。これら3項目は画素数などと違ってすぐには確認できないものである。機器を精密に使う際、機器ひとつひとつの個性、すなわち器差が見えてくる。これら3項目は、器差が目立つものであり、その性能を独自に確かめることは大変重要になってくる。

表1に出ていない項目で、観測上重要になるのは、(1)暗電流の時間安定性、(2)暗電流の温度依存性、(3)CCD画素の、入力に対する出力の線形性(以下、これをCCDの線形性と記す)である。(1)は、ダーク・フレームをどの程度頻繁に取得すべきかの戦略に重要な情報であり、(2)はCCDチップの冷却温度を決める際に重要な情報であり、(3)は適正な露出時間や、観測に適した明るさの天体選別の際に重要な情報である。これらはカタログにも手引書にも記載がない。独自の室内実験で確かめるしかない。

独自の室内実験は、卒業研究として、西端(2003)、

表1 CCDカメラの性能の仕様値

カメラ名	ST-7E	ST-9E	STL-1001E
画素サイズ (μm)	9×9	20×20	24×24
画素数	510×765	512×512	1024×1024
A/D変換 分解能	16 bit	16 bit	16 bit
チップ型番 (Kodak製)	KAF-401E	KAF-0261E	KAF-1001E
読み出しノイズ (電子数rms)	15	13	14.8
ゲイン (電子数/ADU)	2.3	2.8	2
暗電流 (電子数、0℃、 1秒、1画素 あたり)	1	35	9
設置年	1998	2000	2009
視野角 (秒角)	122×184	270×270	648×648
1画素に対応 する角度 (秒角)	0.24	0.53	0.63

和歌山大学教育学部屋上天文台にある3種のCCDカメラ(いずれもSBIG社製)の、仕様として記されている性能と、設置年(購入年と同じ)、60cm望遠鏡の焦点距離7800mmのカセグレン焦点に取り付けた時のチップ全体の視野角と1画素に対応する角度。最後の2段は実測であり、焦点距離7800mmから計算される値と一致している。網掛けの部分は、精密な独自測定もした項目。

山口(2006)、尾崎(2011)がそれぞれ行った。西端(2003)はST-7EとST-9Eについて、教育学部屋上天文台ドーム内または教育学部自515号室暗室にて、光源が必要な場合は、暗室内の白熱電灯を、照度計(トプコン製IM-5)で測定して補正しつつ用いた。山口(2006)はST-9Eについて、和歌山大学学生自主創造科学センター(クリエ)の工場内にて、光源が必要な場合はモノクロメーター(日本分光製、2004年に購入)を用いた。尾崎(2011)はSTL-1001Eについて、教育学部自515号室暗室または屋上天文台待機室にて、光源が必要な場合はモノクロメーター(上記のものと同じ)を用いた。日本分光製のモノクロメーターはCCDカメラの測光性能特性を調査する目的で購入したもので、光量変動が相対比1.0%で、波長2500 μm から12000 μm まで、波長幅を変えつつ単色光を出力させることができるものである。西端(2003)の測定では、一般の白熱電灯を用いており、光量変動が相対比10%に及ぶと考えられ、測定精度が十分でないかもしれないことに注意が必要である。

フィルターの透過曲線についても、モノクロメーターが利用になった後、測定された。山口(2006)がST-7

EやST-9Eで使うフィルター、Johnson U , B , V と Cousins R_c , I_c の5つの広帯域フィルターについて、尾崎(2011)がSTL-1001Eで使うフィルター(これは上記のフィルターとは別物)、Johnson U , B , V と Cousins R_c , I_c の5つの広帯域フィルターと6つの狭帯域フィルターについて、透過曲線を描いた。フィルターの透過曲線のまとめについては機会を改めてまとめることとしたい。

いずれの測定でも、OSがWindowsのノート型PC上で動作する、カメラ制御ソフトウェアCCDOPS-Jを使って露出時間、CCDチップ冷却の設定温度、データ取得を制御し、画像はすべてFITS形式で保存した。画像の解析は、Linux上で動作する、天体画像解析ソフトウェアIRAFを用いた。測光性能を調べるにあたり、その方法については宮坂、市川(1999)を参考にした。測定にあたっての詳細な点、結果を得る際の中間的な図表については、3編の卒業研究に記してある。この論文で全てを転載していないが、この論文の読者で、これらのデータが必要な方は、著者の富田まで連絡いただければ、すべてお渡しする。

3. 独自測定の結果(1)

表2は、表1で網掛けした部分の、独自調査の結果である。3項目とも、ST-7EとST-9Eについては西端(2003)、STL-1001Eは尾崎(2011)によるものである。読み出しノイズの測定法は、以下のようにした。0秒露出のダーク・フレームを2枚用意し、互いに引き算した後のフレームのカウント値の統計を取った。ここでの標準偏差を2の平方根で割った値が、読み出しノイズ(カウント値の単位で)になる。2枚の画像から引き算するのは、系統誤差を取り除き、ランダム誤差のみを取り出すためである。CCDOPS-Jによる制御では、0秒の露出時間という設定ができない。尾崎(2011)は、露出時間を変えて上記の標準偏差を求め、それを直線で回帰して0秒でのランダムノイズ(二乗平均平方根 root mean square; rmsで表現)を推算する方法で求めているが、西端(2003)はそこまではしていない。CCDチップの温度を -10°C にし、露出時間を、設定可能な最短の0.11秒とした際のランダムノイズの値から引用した。読み出しノイズの正しい値はこれより少し小さな値だろうが、その差は0.1に満たないはずである。それを考慮すると、読み出しノイズは、仕様での値と大きく外れていない。STL-1001Eに至っては、仕様での値とぴったり一致した。読み出しノイズの値を電子数で表現するには、カウント値での表現にゲインの値をかけたもので計算した。

ゲインの値は、西端(2003)、尾崎(2011)ともに、以下の方法で求めた。ある露出時間でライト・フレームを2枚作成する。カウント値の統計を取り、平均値に有意な違いがないことを確かめ(したがって、光源の時

間安定性が不十分でも、この測定は精度高く行うことが可能である)、それらで引き算する。横軸にカウント値の平均値、縦軸に、引き算した後のフレームの分散(標準偏差の自乗)を2で割ったグラフを作成する。さまざまなカウント値平均値をもったものをこのグラフ上にプロットすると、直線で回帰できる分布になる。その回帰直線の傾きの逆数がゲインの値である。尾崎(2011)は、ゲインの値に若干の波長依存性が認められるという報告もしている。ただし大きな依存性ではない。ゲインの値は、仕様での値とかなり近い値が出た。

暗電流の値の求め方については、次の4章に記した。表4に示した式の、0℃での t の係数に、ゲインをかけ算したものが、表2に記したものである。

暗電流の値は、仕様と全く違った値になった。ST-7

表2 CCDカメラの性能の実測値

カメラ名	ST-7E	ST-9E	STL-1001E
読み出しノイズ (電子数rms)	11.7	16.2	14.8
ゲイン (電子数/ADU)	2.33	2.75	2.12
暗電流 (電子数、0℃、 1秒、1画素 あたり)	0.30	38.1	0.58

表1で網掛けした部分の独自調査の結果。ST-7EとST-9Eについては西端(2003)、STL-1001Eは尾崎(2011)による。ST-7EとST-9Eの読み出しノイズについて、正しい値はここでの値より少し(0.1未満と推定される)小さい値と考えられる。

E、ST-9E、STL-1001Eそれぞれ、仕様での値より30%、109%、6%という値になった。暗電流の値が小さい方が淡い天体を写すことができ、性能は高い。一般に、仕様での値に比べ、実際の性能は劣ることが多い。ST-9Eについてはほぼ仕様通り、ST-7EとSTL-1001Eについては、仕様よりずっと良好な値である。

4. 独自測定の結果(2)

CCDカメラの電源を投入して、暗電流の値が安定するまでの時間が測定されている。結果を表3にまとめた。STL-1001Eは他2者に比べて長い時間となっているが、尾崎(2011)は、これはCCDチップ全体の面積の広さで説明できるとしている。

暗電流の温度依存性と時間依存性が測定されている。

表3 CCDカメラ電源投入後に、暗電流の値が安定するまでの時間

ST-7E	15分(西端2003)
ST-9E	15分(西端2003)、10分(山口2006)
STL-1001E	50分(尾崎2011)

室温変動を抑えた暗室(ないしは暗室に近い環境下)で、CCDチップの設定温度と露出時間を変えてダーク・フレームを取得した。CCDチップの設定温度それぞれに対し、露出時間 t 秒に対し、1画素あたりのカウント値 C について、表4に示す回帰直線を得た。いずれも線形性が大変高い。また、温度が上がるにつれ、暗電流の値が単調に増加する点は、期待どおりである。ただし、回帰直線の式の切片の値が、CCDチップの設定温度に依存していることには注意が必要である。露出前のCCDチップの電荷掃き出しが不十分か、露出終了後の電荷転送中に溜まる電荷が影響しているか、といった原因が考えられる。山口(2006)は5℃、10℃についても測定したが、CCDカウントの飽和近くの値を含んだ回帰直線を示していて、表3に引用した参考値としてはこれらを除外した。ST-9Eについて、0℃での回帰直線の式が、西端(2003)と山口(2006)で、違いが目立っている。山口(2006)での測定で、CCDの飽和に近い高いカウント値を含めた回帰が原因か、2002年から2005年までの経年変化か、どちらかであろう。

CCDカメラ制御ソフトウェアCCDOPS-JでCCDチ

表4 暗電流の温度依存性

ST-7E(西端2003)	
10℃	$C=0.3945t+113.4$
5℃	$C=0.2223t+109.4$
0℃	$C=0.1277t+109.7$
-5℃	$C=0.0776t+106.1$
-10℃	$C=0.0426t+105.5$
ST-9E(西端2003)	
10℃	$C=35.83t+349.2$
5℃	$C=22.36t+264.8$
0℃	$C=13.85t+198.2$
-5℃	$C=8.678t+180.0$
-10℃	$C=5.498t+147.1$
ST-9E(山口2006)	
0℃	$C=13.43t+356.6$
-5℃	$C=8.686t+185.8$
-10℃	$C=5.504t+150.7$
STL-1001E(尾崎2011)	
10℃	$C=1.336t+117.3$
5℃	$C=0.6153t+111.3$
0℃	$C=0.2747t+109.0$
-5℃	$C=0.1276t+108.5$
-10℃	$C=0.0644t+107.2$

暗電流の温度依存性について、CCDチップの設定温度それぞれに対し、露出時間 t 秒に対し、1画素あたりのカウント値 C についての回帰直線。

ップの温度を固定した際の、暗電流のカウント値の時間安定性が測定されている。室温変動を抑えた暗室(ないしは暗室に近い環境下)で、CCDチップの設定温度と露出時間を一定にし、ダーク・フレームを取得した。表3に示した、カウント値の安定のための時間経過後の、独立したダーク・フレームの、フレーム全体のカウント平均値の標準偏差を、表5にまとめた。いずれもCCDチップの温度は -10°C に設定、露出時間は60秒に設定された時の測定である。

表5を見ると、一晩の観測の中で、暗電流のカウント値は大変安定していると考えたいところである。しかし、これは空調をきかせたり、また室温変化が小さいことを確認しつつの室内実験による結果である。実際の観測では、気温や湿度の変化、望遠鏡の姿勢の変化に伴うCCDカメラの姿勢の変化が暗電流のカウント値に影響する可能性がある。

なお、暗電流値を下げるために水冷を併用することができるが、水温の時間安定性を確保することが簡単でなく、かえって暗電流値の変動を招くことが西端(2003)によって確認されている。

CCDの線形性が測定されている。表6にまとめた。

表5 暗電流の時間安定性

ST-7 E	(西端2003)	0.55	(600分間の測定)
ST-9 E	(西端2003)	0.79	(600分間の測定)
ST-9 E	(山口2006)	0.8	(225分間の測定)
STL-1001E	(尾崎2011)	0.68	(300分間の測定)

60秒露出の暗電流のカウント値の平均値の時間安定性について、CCDチップの温度は -10°C に設定し、独立したダーク・フレームの、フレーム全体のカウント平均値の標準偏差を測定したもの。

CCDの線形性を γ 値で評価し、 $\gamma=1$ からのずれを相対誤差で表したものである。西端(2003)は、モノクロメーター導入前の測定である。

この測定は、露出時間を変えてライト・フレームを取得し、そのカウント値の平均値の変化を見ることで行った。ここで光源の光量時間安定性が大きな問題になる。一般の光源であろうと、モノクロメーターで採用されている時間安定性の高い光源であれ、光量の時間変動に影響されない測定法が必要である。露出時間を短い方から長い方へ、そして逆に長い方から短い方へ、また露出時間を順にとびとびに長くして、また、とびとびに間を埋めるように短くして、さらに何度も独立に試行し、これらと同じグラフの上にプロットすることで、光量の時間変動の影響を相殺することとした。

西端(2003)、山口(2006)、尾崎(2011)がいずれも指摘するように、高いカウント値から低いカウント値まで総合すると誤差は大きくなるが、ある程度のカウン

ト値範囲に区切ると線形性はとてよくなる。図1、2、3は、それぞれST-7 E、ST-9 E、STL-1001Eについて、横軸にカウント値の平均値、縦軸に $\gamma=1$ からのずれの相対比をとったグラフである。

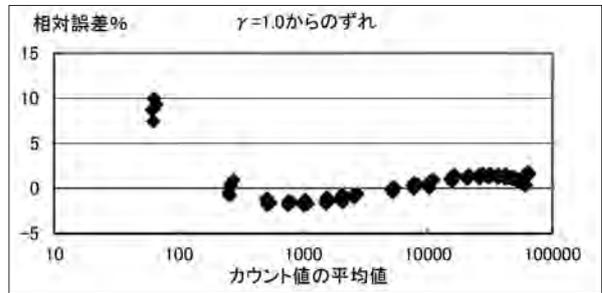


図1 CCD線形性(ST-7 E)

ST-7 EのCCD線形性の $\gamma=1$ からのずれの相対比を、カウント値の平均値ごとにとったもの。西端(2003)の図9bを改編。

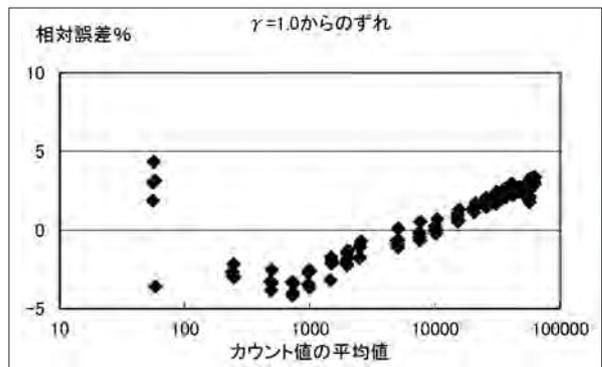


図2 CCD線形性(ST-9 E)

ST-9 EのCCD線形性の $\gamma=1$ からのずれの相対比を、カウント値の平均値ごとにとったもの。西端(2003)の図11bを改編。

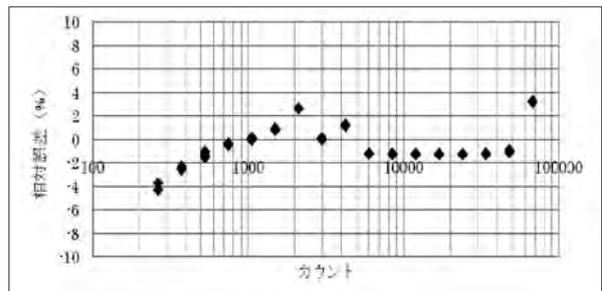


図3 CCD線形性(STL-1001E)

STL-1001EのCCD線形性の $\gamma=1$ からのずれの相対比を、カウント値の平均値ごとにとったもの。尾崎(2011)の図3-2cの500nmでの結果を引用。

ST-7 EやST-9 Eでは約1000カウントを境に、STL-1001Eでは約2000カウントを境に、それより低いカウントと高いカウントで、線形性の傾向が互いに変わっている。低いカウント値だけを使う測光、高いカウント値だけ使う測光をすれば、測光精度は相対誤差1%を十分切るができるだろう。

表 6 CCD線形性のまとめ

ST-7E(西端2003)
CCDカウント値：250以上60000以下で2%
ST-9E(西端2003)
CCDカウント値：250以上60000以下で4%
ST-9E(山口2006) ²⁾
CCDカウント値：1000以上50000以下で2%以下
STL-1001E(尾崎2011)
CCDカウント値：2000以上60000以下で2%
CCDカウント値：6000以上60000以下で1%

CCDの線形性を γ 値で評価し、 $\gamma=1$ からのずれを相対誤差で表したものを。

謝辞

この論文をまとめるにあたり、西端一憲氏、山口卓也氏、尾崎香織氏には、卒業論文のデータの利用を快く承諾いただいた。

注

- 1) 尾崎(2011)図3-3cを見ると、STL-1001Eの例だが、露出時間0.11秒でのランダムノイズは、露出時間0秒でのランダムノイズに、電子数で0.01の桁でしか変わらないことが読み取れる。
- 2) 山口(2006)ではCCDの線形性は相対比0.02%以内と記されているが、百分率の計算間違いだろう。

参考文献

- 宮坂正大、市川伸一(1999)「市販冷却CCDカメラの性能評価」、国立天文台報 Vol. 4, 59-73
- 西端一憲(2003)「CCDカメラST-7E、9Eの測光特性」和歌山大学教育学部天文学ゼミ2002年度卒業論文
- 山口卓也(2006)「CCDカメラST-9Eの測光精密評価」和歌山大学教育学部天文学ゼミ2005年度卒業論文
- 尾崎香織(2011)「CCDカメラSTL-1001Eの性能評価」和歌山大学教育学部天文学ゼミ2010年度卒業論文
- 富田晃彦(2011)「和歌山大学教育学部屋上天文台 一望遠鏡および観測装置」和歌山大学教育学部紀要(自然科学) Vol.61, 17-22