

市販冷却CCDカメラシステム、 SBIG製ST-8XME-NABGの性能テスト

山縣 朋彦*・伊藤 信成**・安田 恵子***・
濱部 勝****・剣持 周子*****・青木 勉*****

Evaluation of the Performance of a Commercial CCD Camera System, SBIG ST-8XME-NABG

Tomohiko Yamagata, Nobunari Ito, Keiko Yasuda,
Masaru Hamabe, Chikako Kenmotsu & Tsutomu Aoki

1. はじめに

かつて、天体観測における可視光・赤外線領域の検出器としては写真が主流であったが、1980年代からCCDカメラが多く利用されるようになってきた。現在では、検出器として写真が使われることは、一部の例外を除いてほとんど無い。また、デジタルカメラの普及に伴い、CCD素子の値段も急速に低下してきたこともあり、アマチュア用の安価なCCDカメラも普及してきている。天体観測では、多くの場合、低照度の光を長時間露光することから、ノイズ対策特に熱雑音による暗電流を押さえるために、CCDカメラを冷却する必要がある。従って、一般のデジタルカメラと天体観測で使用されるCCDカメラのもっとも大きな違いの1つは、冷却機能の有無である。研究用のCCDカメラでは、冷凍機や液体窒素を利用して、暗電流の心配の低い-100℃程度まで冷却することが多い。市販のCCDカメラでは、冷却のためにペルチェ素子を利用して電氣的に冷却し、ファンや水冷装置で熱を逃す機構がついていることが多いので、暗電流を完全に無視できるところまで冷却できるものはまれである。

最近では、市販のCCDカメラの性能も上がり、測光観測にも十分耐えうるものも出てきていて、コストパフォーマンスの良さから研究目的のモニター観測等でも利用されることが多くなってきている。ただし、問題点はカタログに記載されている性能の評価の条件が必ずしも明確では

* やまがた ともひこ 文教大学教育学部

** いとう のぶなり 三重大学教育学部

*** やすだ けいこ 三重大学教育学部

**** はまべ まさる 日本女子大学理学部

***** けんもつ ちかこ 日本女子大学理学部

***** あおき つとむ 東京大学大学院理学系研究科木曾観測所

ないために、その性能評価を別途する必要があることである。その試みはそれぞれのCCDカメラについてなされているが、一般に公表されているものは数少ない（例えば、宮坂・市川（1999）¹⁾、小熊・水野（1999）²⁾、稲村・中垣（2006）³⁾）。

文教大学教育学部地学研究室では、平成17年度文教大学学長調整金で教育研究用にSBIG社製CCDカメラシステムST-8XME-NABGを購入した。これを同じく平成16年度文教大学学長調整金で購入した30cmセレストロン社製望遠鏡（CGE1100）に取り付けてデータ取得に利用している。このCCDカメラの基本性能を東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター木曾観測所のCCD較正装置を利用して測定したので報告する。

2. CCDカメラシステム

SBIG社製CCDカメラシステムST-8XME-NABG（図1）には、2つのCCD素子がついている。1つは、ガイド用の素子でTI社製TC-237Hである。メインの撮像用の素子の脇に設置してあって、ガイド星を指定することによって望遠鏡にオートガイド信号を出す事が可能となっている。メインの撮像用のCCD素子は、コダックのKAF-1603MEである。今回はこちらのKAF-1603MEについて、基本性能を調べた。KAF-1603MEのピクセル数は 1530×1020 、ピクセルサイズは $9 \mu \times 9 \mu$ である。この素子の表面にはマイクロレンズがついていて、素子の隙間の不感光領域に落ちる光を拾って開口率を稼ぐ働きをしている。そのため、見かけ上の量子効率を上げることに役立っている。なお、製品名のNABGはアンティブルーミング機能がついていないという意味である。惑星等の比較的明るい天体を観賞用に撮影するときには、CCD素子が飽和したときの光電子の漏れによる画像の乱れが問題になることがある。アンティブルーミングとは、それを防ぐために光電子が飽和に近づくと意図的に光電子を外部に流す機能である。ST-8XMEでは、この機能を持つ素子KAF-1602LEを装着したのものもある。しかしながら、この機能のために入力信号に対する出力信号のリニアリティーが保証されず、データ取得用には必ずしも適さないと考える。

ST-8XMEの冷却はペルチェによるヒートエクスチェンジャーで、カタログによると、ファン

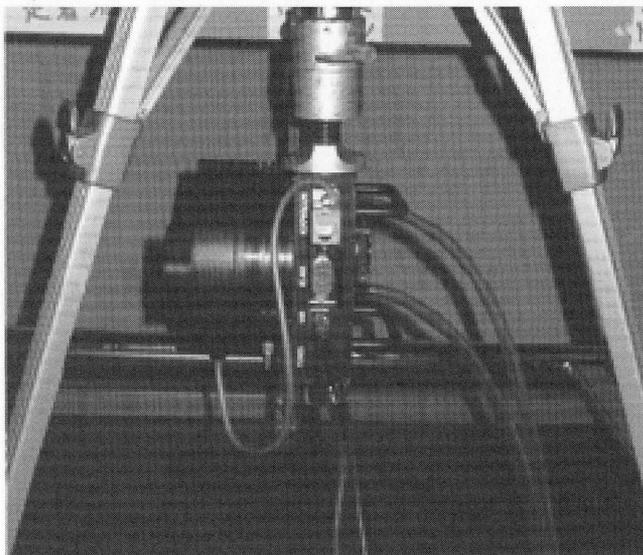


図1 SBIG製CCDカメラシステムST-8XME-NABG。右に出ている2つの管は水冷のための水を循環するパイプである。測定のために三脚に取り付けてある。

による空冷支援と合わせて、外気温 -35°C まで冷却可能である。さらに、水冷支援装置がついていて、これを使うとさらに外気温 -45°C まで冷却可能とすることになっている。露光は回転式シャッターで制御している。ADコンバータは16ビットである。フィルターは別売のフィルターホイールCFW-8AをCCDカメラシステムの前面に取り付けることによって使用できる。フィルターは通常の色写真合成用のRGBフィルターが附属しているが、観測データ取得の便宜を考えて、国際光器製の天体測光用ジョンソンカズンズフィルター(UBVRI)を購入し、置き換えた。メーカーによる透過率データは図2のとおりである。この他に、補償光学システム(AO-7)を取り付けることも出来るようになってきている。CCDカメラシステムはUSBによりコンピュータと接続し、制御するようになってきている。制御ソフトはCCDOPS ver5.40JでWindowsXP上で動作する。他のOSに対応した制御ソフトもサードパーティーから利用可能のようである。制御ソフトCCDOPSはフィルター制御やデータ取り込み、温度コントロール等必要なことは、ほぼリモートで行えるが、積分時間が0.11~3600秒に限られ、積分時間0のバイアス取得ができない点が問題である。

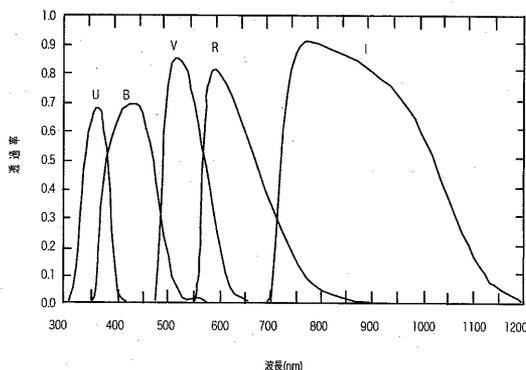


図2 国際光器製の天体測光用ジョンソンカズンズフィルター(UBVRI)の透過率曲線(フィルター添付の資料より作成)

3. CCD校正装置

今回、測定に使用したCCD校正装置(図3)は、東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター木曾観測所が所有する日本分光製の装置であり、モノクロメーターの部分と積分球(Oriel 40481)からなっている。写真で左側の箱の中に電源と2次光除去のフィルターがあり、その後部に光源がある。中央の小さい箱の中にグレーティング(1200本/mm)が内蔵されていて、出射光の波長を制御している。出射光は右の箱内の光学系を通して、積分球に送られる。積分球の直径は8インチ、出射穴径は2インチである。光源のハロゲンランプはPhilips製Type7158である。モノクロメーターからの出射光の波長はスキャナーでの自動制御も可能になっているが、今回は手動で行った。波長範囲は200nmから1400nmまで $\pm 1.0\text{nm}$ の制度で制御可能である。

4. 測定

CCD校正装置による測定は2006年7月29-30日および、10月27日に木曾観測所の暗室で行った。いずれも暗室内の空調により室温を約 20°C に設定した。暗電流の測定は9月6日及び9月

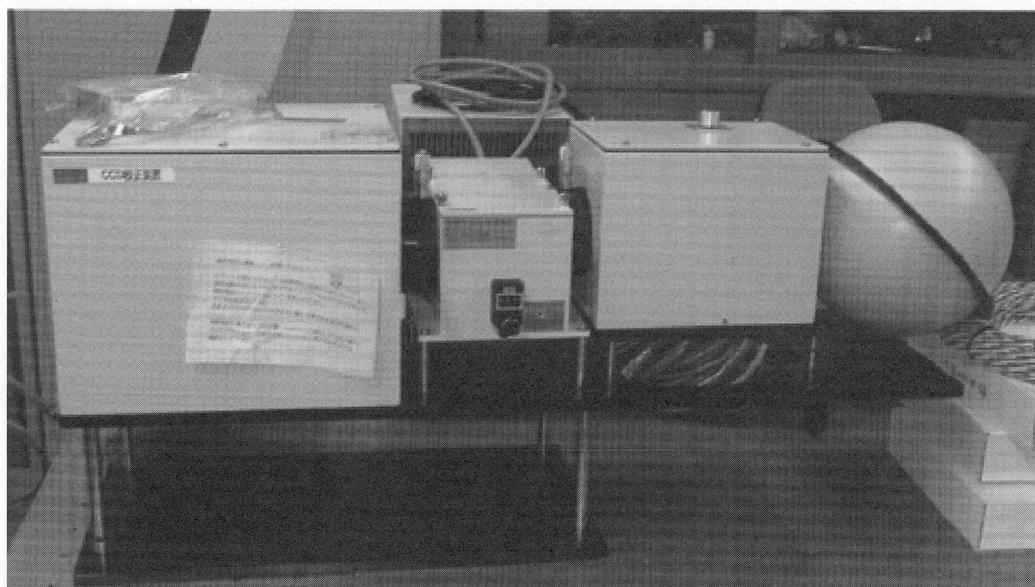


図3 日本分光製CCD較正装置。左の箱の中に電源と2次光除去のフィルターがあり、その後部にハロゲンランプの光源がある。中央の箱の中にグレーティング（1200本/mm）が内蔵されている。出射光は右の箱内の光学系を通して、積分球に送られる。

8日に文教大学地学研究室において、空調により室温を約20℃にして行った。温度設定はカタログによると水冷支援を行った場合で、周囲の温度よりも-45℃までとのことである。従って、外気温20℃の場合は-25℃まで可能と言うことになるが、ペルチェの能力一杯まで使用すると、温度や電気系統が不安定になってしまう。試行錯誤の結果、今回の環境では、-17.37℃で、ペルチェの能力約84%（制御ソフトの示す値）になり、温度変化が落ち着くことが分かったので、今回の環境では、-16℃を現実的な冷却温度と考え、実験を行った。データ解析にはMacOSX上のIrafを使用した。

4.1 暗電流

暗電流、即ちダークカウントは多くの場合、-100℃程度まで冷却することで、ほぼ無視できるところまで減ることが分かっているが、そのための冷凍機や液体窒素等の冷却装置を準備することは、安価な市販CCDカメラでは、現実的ではない。そこで、ここでは、附属の冷却装置で容易に実現可能な温度である、常温（+20℃）、0℃、-16℃に設定した場合の、ダークカウントの平均（図4）及び標準偏差（図5）の変化を調べた。いずれも横軸は暗電流の積分時間（秒）である。縦軸は平均及び標準偏差の値で、各ダークフレームの全ピクセルから求めた平均及び標準偏差のカウント値(ADU)である。図から分かるように、ダークカウントの平均は0℃以下であれば、積分時間3600秒以下でほとんど変化しないことが分かる。従って、少なくとも0℃以下に冷却することが望ましいといえる。ただし、標準偏差を見ると明らかに温度依存があり、-16℃でも30秒以上の積分で、ダークカレントのばらつきが上がりはじめ、いわゆるホットピクセルが増え始める様子が分かる。この様子は、ダークフレームのヒストグラム（図6a,b）に良く現れている。図6aは設定温度-16℃、積分時間600秒のダークフレームのヒストグラムである。図

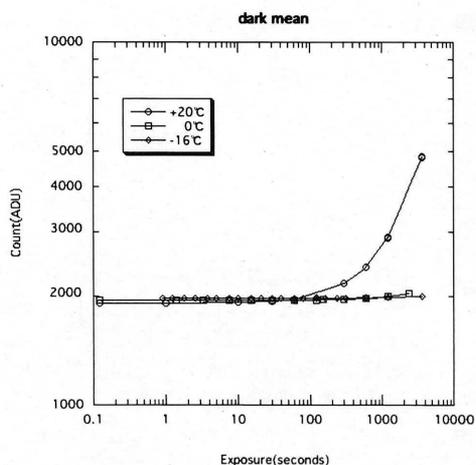


図4 積分時間とダークフレームの平均カウントの変化の様子。横軸は積分時間（秒）、縦軸はダークフレームの平均カウント（ADU）である。設定温度は+20℃、0℃、-16℃でそれぞれ測定した。

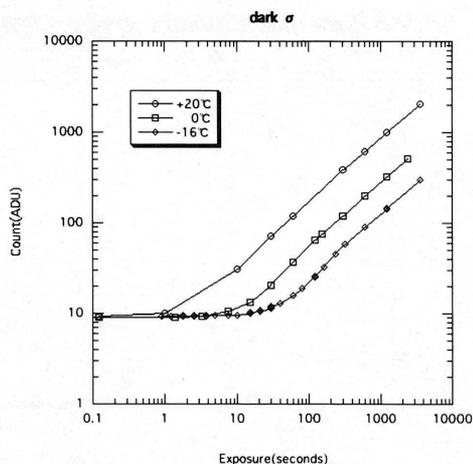


図5 積分時間とダークフレームカウントの標準偏差の変化の様子。横軸は積分時間（秒）、縦軸はダークフレームの平均カウント（ADU）である。設定温度は+20℃、0℃、-16℃でそれぞれ測定した。

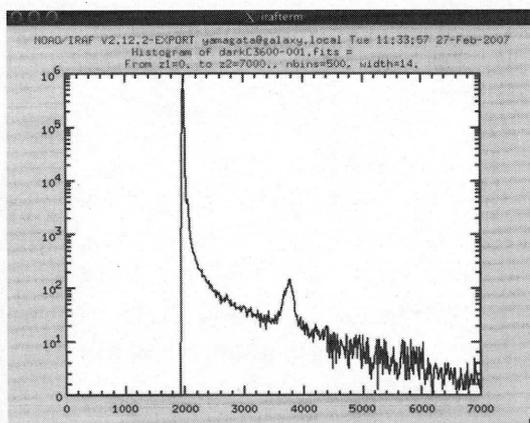
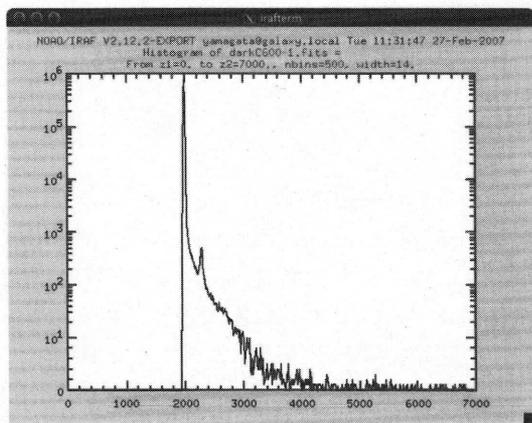


図6 図6a（左）は設定温度-16℃、積分時間600秒のダークフレームのカウントに対するヒストグラムである。図6b（右）は積分時間3600秒のダークフレームである。

6bは積分時間3600秒である。積分時間と共にホットピクセルのダークカウントが増加していく様子が分かる。図4、図6からこのCCDのバイアスカウントは1950ADU付近であることが推定できる。図6で特徴的なのは、図6aで2250ADU付近、図6bで3750ADU付近のピークの存在である。この現象はコダックの他のCCD素子、KAF-1001Eでも報告されている（柳沢（2006）⁴⁾）。原因はHowell（2006）⁵⁾によると、CCD製造段階での欠陥とのことである。このピークのカウントの値（バイアスを引いた値）は積分時間に比例して増加する傾向がある。

以上から、-16℃程度の冷却では、平均レベルでの暗電流の上昇はないが、ホットピクセルの暗電流の量は確実に増加し、且つ素子の欠陥により不均一な分布となることが分かる。これら

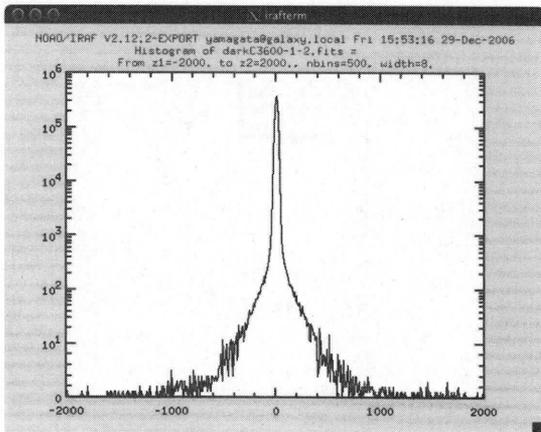


図7 3600秒露出のダークフレームを2枚で、それぞれのピクセルごとに引き算を行って作ったフレームのヒストグラム。縦軸は対数目盛であることに注意。素子欠陥による影響は消えている。

の影響をできるだけ除去するために、オブジェクトフレームと同じ積分時間のダークフレームをとって、ピクセルごとの引き算を行うことが必要となる。この効果を確かめるために、3600秒露出のダークフレームを2枚とり、それぞれのピクセルごとに引き算を行ったフレームのヒストグラムを示したのが図7である。この結果から、素子欠陥と暗電流の影響はピクセルごとの減算で、かなりの部分が補正可能であることが分かる。従って、このCCDカメラでは、 -16°C 程度の冷却の場合、フラットフィールドによる補正の前に、ダークフレームを利用することが必須である。

4.2 分光感度特性

分光感度特性測定のために、光源からの出射光の中心波長を変化させて、CCD素子のカウントを測定した。出射光の半値幅は1.0 nmである。300 nmから1100 nmまで20 nmおきに波長を変えて、フィルター無しで積分球からの光を30秒積分した。得られた各フレームからは、同一積分時間のダークフレームを減算した。光学系の影響により、CCD素子全体に必ずしも一様な光が当たらない可能性があるのと、時々出力むらが生じることがある（後述）ので、測定値は、中心部分[600:900,400:600]のみを使い、平均を求めた。今回は、絶対較正までは出来なかったため、ハロゲンランプの色温度を3000 Kと仮定して、相対値として分光感度特性を求めた。結果は図8aに示したとおりである。なお、光源のハロゲンランプの色温度は、仕様書によると、電源電圧24 Vで、色温度3400 Kである。今回の測定では電圧を15 Vに設定したので、色温度は90%程度下がっていることになる（CCD較正装置仕様書（2000）⁶⁾より）。図8bはメーカー提供のKAF-1603MEの量子効率である。両者を比較すると、長波長側の感度特性は概ね一致しているが、感度のピーク位置は今回の測定値の方がやや短波長側になっている。また、ピークよりも短波長側での感度は測定値の方がかなり下がっていることがわかる。このCCDカメラでは、冷却の際の水滴防止のために、CCD素子は乾燥剤と共に封入されている。そのために受光部には窓材が使われている。この窓材は、販売元によると、BK7にコーティングを施したものとのものであるが、その特性の詳細が不明であるので、断言は出来ないが両者の違い、特に短波長側の違いはこの窓材の影響と考えられる。

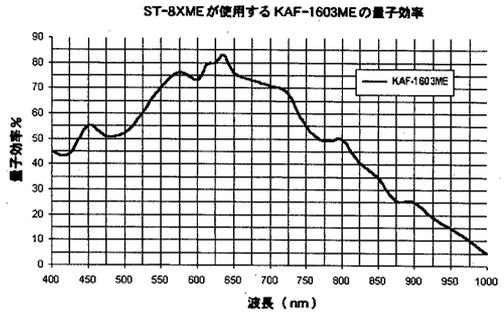
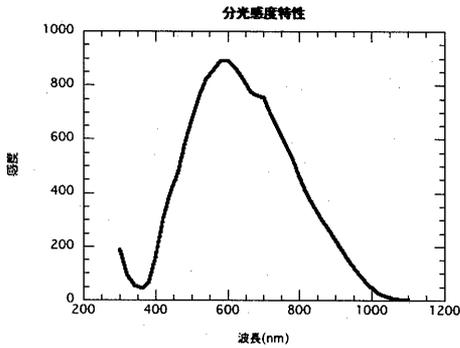


図8 分光感度特性。横軸は波長 (nm) で縦軸が感度を表す。図8a (左) は今回測定したもので、測定は相対測定のために縦軸の値は任意である。また、光源の色温度は3000 Kを仮定している。図8b (右) はメーカーの資料にある分光感度 (量子効率) の様子である。

4.3 リニアリティー

CCDカメラに国際光器製のジョンソンカズンズフィルター (UBVRI) を取り付けて各バンドのリニアリティーを測定した。光源からの出射光は半値幅を1.0 nm、中心波長をUバンドは350 nm、Bバンドは450 nm、Vバンドは520 nm、Rバンドは650 nm、Iバンドは850 nmに設定した。Uバンド以外の各バンドについて、0.9秒から飽和するまで、積分時間を変えてカウントを測定した。各バンド各積分時間のカウント値は、各フレームから、積分時間に対応するダークフレームを減算し、中心部分 [600:900,400:600] の平均をとったものである。また、測定は各積分時間について、5回ずつ測定し、平均している。結果は図9に示したとおりである。Uバンド以外は飽和する直前まで、良好なリニアリティーが得られている。Uバンドについては、図5aの分光感度からも分かるように、感度は期待できないが、320秒まで積分した結果を見ると、かろうじてカウントが上がっている事が分かる。しかしながら、いずれにしても通常の使用では、実用的ではないと考えられる。

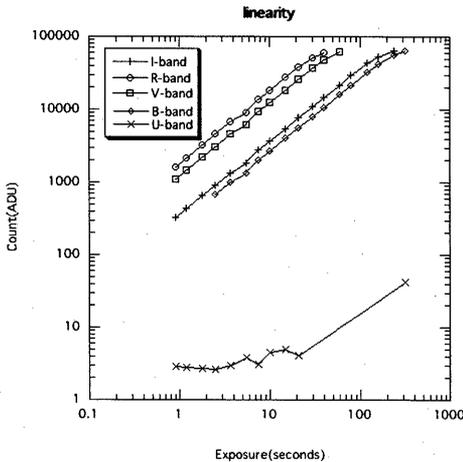


図9 UBVRIそれぞれのバンドのリニアリティーの様子。横軸は積分時間 (秒) で、縦軸はフレームの中央部分 [600:900,400:600] について、ダークを差し引いた後の平均カウントである。

4.4 ゲイン

ここでいうゲインは、CCDの出力カウント（ADU）と実際にCCDから出てくる光電子の個数（ e^- ）の比である。各積分時間で、同一積分時間のフレームの差を取って、その分散と、平均値の2倍をプロットすることにより、このゲインを求めることが出来る。リニアリティと同様に、平均値、分散を求める際には、中心部分 [600:900,400:600] のピクセルのみを使った。図10はBバンドの例である。これより、Bバンドのゲインは最小二乗フィットにより $2.62e^-/ADU$ となった。同様にして、Vバンドは $2.75e^-/ADU$ 、Rバンドは $2.77e^-/ADU$ 、Iバンドは $2.66e^-/ADU$ となった。メーカーのカタログによると、 $2.6e^-/ADU$ とあるので、ほぼ仕様通りの値となっていることが確認された。読み出しノイズについては、バイアスの測定が出来ないので、7月29日に測定した0.9秒積分の2枚のダークフレームの差をとり、暗電流を無視出来るものとして、その分散を $\sqrt{2}$ で除して求めた。値は8.83ADUとなった。ゲインを $2.6e^-/ADU$ とすると、 $23e^-$ となる。因みにカタログ値は $15e^-$ である。今回の測定値に暗電流の影響があるとしても、読み出しノイズについてはカタログ値まで出ていない。原因としては暗電流の影響以外には電源の安定性の問題が考えられる。原因解明には、より詳細な検証が必要である。

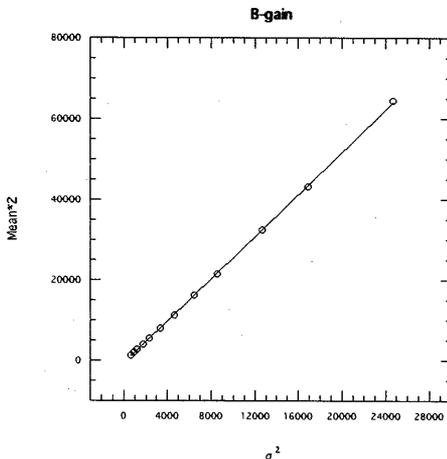


図10 Bバンドのゲインの測定。横軸は2つのフレームの差の分散、縦軸は差のフレームの平均値の2倍である。

5. その他

素子全体の様子を調べるために、全体に一樣に光が当たるようにして、各バンドについて、露光した。CCD素子の大きさに比べて、積分球の大きさが必ずしも十分ではないために、積分球本来の使い方によって一樣光を得ることは困難であるので、CCDカメラと積分球の距離を約1m離し、素子全面に一樣に光が当たるようにした。図11aはVバンドで600秒積分した場合のフレーム全体の様子である。丸く見えているのは、フィルター上の埃であると考えられる。図11bは図11aのフレームを同じ条件で別にとったフレームで割り算したものである。これから、バンドが同じであればパターンは保存されることが確かめられた。他のバンドでも結果は同様である。

ただし、出力むらの現象があることも確認された。図12はVバンドで、同条件で、300秒積分の場合のフレームの一例である。左下を二次元座標（xy）の原点として、ピクセルを示すと、

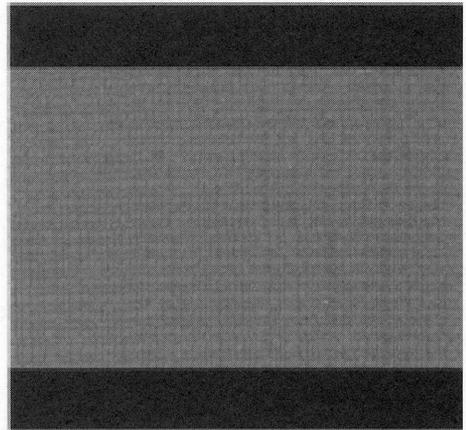
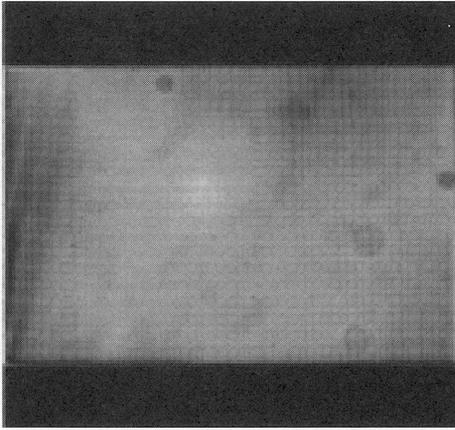


図11 図11a(左)はVバンドで積分球からの一様な光で600秒露光した場合のフレーム全体的様子である。丸く見えているのは、フィルター上の埃であると考えられる。図11b(右)は図11aのフレームを同じ条件で別にとったフレームで割り算したものである。

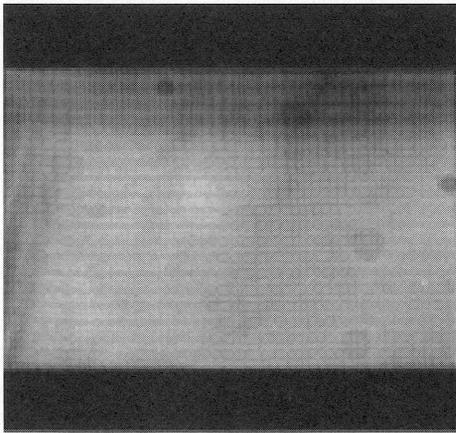


図12 図11aと積分時間以外は同じ条件で積分したもの。積分時間は300秒。左下を2次元座標(xy)の原点とすると、 $y > 805$ のピクセルでの光電子の出力がスムーズにいかないことがある。

$y > 805$ のピクセルでの光電子の出力がスムーズにいかない場合がある。因みにこのフレームでの $y > 805$ でのカウントはおよそ3500ADU、 $y < 805$ ではおよそ3600ADUである。必ずしも再現性があるわけでもないので、因果関係は不明であるが、露光量が少ない場合におきる可能性があるような印象である。

6. 最後に

今回の測定では、ST-8XME-NABGについて、おおまな基本性能の測定をした。その結果、分光感度特性については、400 nm以下の短波長即ち、Uバンドでは、カタログ値ほどには感度はなく、実用的なものとは言えなかった。しかし、BVRIの各バンドでは、十分に使用に耐える感度が確認された。また、各バンドについて、飽和直前まで良好なリニアリティーを示すことが分かった。冷却に関しては、3600秒以内の露出に関しては、0℃以下に冷やすことが必要であり、-16℃程度でもデータ処理の際にはダークフレームの減算が必須であることが分かった。

今後は、実際に望遠鏡に装着した際のフラットフレームの様子と限界等級について定量的に調べる必要がある。

謝辞

本研究の一部は文教大学共同研究費によるものである。また、東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター木曾観測所の装置を利用させていただいた。東京学芸大学教育学部の西浦慎悟氏には資料提供をうけた。国立天文台岡山天体物理観測所の柳沢顕史氏には貴重な情報提供をいただいた。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 宮坂正大、市川伸一：市販 CCD カメラの性能評価、国立天文台報、459-73 1999
- 2) 小熊竜一、水野孝雄：市販 CCD カメラの試験的導入とその性能評価、東京学芸大学紀要第 4 部門、51 57-65 1999
- 3) 稲村真琴、中垣輝子：簡易積分球の自作と市販 CCD カメラの性能評価、日本女子大学理学部卒業論文、2006
- 4) 柳沢顕史：private communication 2006
- 5) Howell, S. B. : Handbook of CCD Astronomy second edition, Cambridge University Press, 2006
- 6) 日本分光：CCD 較正装置仕様書中の取扱説明書・SO-H150 型ハロゲンランプ、p.2-3, 日本分光株式会社, 2000