

可視光多波長撮像装置 MINT 新 CCD カメラの性能評価 I

高木 悠平、新井 彰、高橋 隼、坂元 誠、鳴沢 真也、伊藤 洋一

兵庫県立大学天文科学センター 西はりま天文台

Performance Evaluation of the New CCD Camera on MINT I

Yuhei TAKAGI, Akira ARAI, Jun TAKAHASHI, Makoto SAKAMOTO, Shin-ya NARUSAWA,
and Yoichi ITOH

*Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,
407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Sayo-gun Hyogo 679-5313, Japan*

E-mail: takagi@nhao.jp

(Received 2013 Feb 28)

概要

兵庫県立大学天文科学センター西はりま天文台の 2m 望遠鏡（なゆた望遠鏡）の可視光多波長撮像装置 MINT に新たに取り付けた CCD カメラの性能評価を行った。新しい CCD カメラは以前のものと比較するとピクセルサイズが大きくなっているため、視野が $10.9' \times 10.9'$ となった。新カメラを MINT に取りつけて観測するとバイアスレベルの変動が確認されるが、オーバースキャン処理をすることでバイアスレベルの変動を取り除くことができる。オブジェクトフレームを撮像した後のフレームには残像が認められ、短波長の光ほど残像が残りやすい。残像の減少傾向は残像量に依らず一定で、その半減期は約 50 分である。

Abstract

We present the results of the performance assessment conducted on the new CCD imager for MINT of Nishi-Harima Astronomical Observatory. The field of view is extended to $10.9' \times 10.9'$ due to the chip size of the new detector. The bias level varies during the observation, however it is able to be eliminated by subtracting the average count of the overscan region. A residual image appears after obtaining object frame, of which the amounts depends on the observed wavelength. The counts of residual image increases as the wavelength decreases. The half-time of the residual image is ~ 50 minutes.

Key words: science instrument – charged coupled device – performance – optical photometry

1. はじめに

西はりま天文台の可視光多波長撮像装置 MINT (Multiband Imager for Nayuta Telescope) は、2m 望遠鏡（通称なゆた望遠鏡）のカセグレン焦点に取り付けられている多波長撮像観測が可能な観測装置である。2005 年より設計・運用してきたが、2012 年に新しい撮像素子を取り付け、併せて筐体も改良した。本稿では改良後の MINT の仕様及び新 CCD カメラの性能評価について報告する。

2. MINT 新仕様

これまで MINT の撮像素子として新たに取り付けられたカメラは FLI 社製の PL23042-1-B である。新たな撮像素子と、撮像素子の変更によって改定された MINT の仕様は以下のとおりである。

Table 1. 改良後の MINT の主な仕様

カメラ仕様	
カメラ、CCD センサ	FLI PL23042-1-B、e2V CCD230-42
画素数、画素サイズ	2048×2048、15 μ m
リニアリティ	5000ADU - 35000ADU $\pm$ 0.25%
ゲイン	2.32 e^- /ADU
リードアウトノイズ	13.9 e^-
MINT 改良後仕様	
視野	10.9'×10.9'
ピクセルスケール	0.32"
限界等級	~21mag (R バンド、300 秒積分時)
フィルタ	$B, V, Rc, Ic, VR, g', r', i', z'$

新たな撮像素子の冷却機構はペルチェ素子を用いた電子冷却であり、これまでの撮像素子で必要だった液体窒素による冷却は不要となった。また、ピクセルサイズが 13.5 μ m から 15.0 μ m になり、視野もこれに応じて約 1' 広がっている。ただし、これは CCD の受光面が広がっただけであり、これに併せた光学系の調整はされていないため、視野の端ではのケラレが発生している。ケラレの程度は設計上、視野の真ん中を中心とした半径 5' の円周から外側では 3%以上、視野の角では 12%以上となっている (尾崎 2006)。

CCD カメラの変更に併せて、MINT の筐体を改良した。CCD カメラが電子冷却のものとなり、以前のものよりサイズが小さくなったため、筐体下部を短縮した。また改良前の MINT は、フィールドレンズの位置がなゆた望遠鏡のノミナルな焦点位置に来ておらず、そのため副鏡を規定位置から大きくずらさないと焦点を合わせることができなかった。この影響により、これまでは MINT で得られる像には収差が残っていたのに加え、MINT とガイド CCD で同時に結像させることができていなかった。今回の改修では、フィールドレンズの位置になゆた望遠鏡の焦点位置が来るように、筐体上部も短縮した。これにより、筐体は全体で 1022.7mm となり、おおよそ 300mm 縮小された。

フィルターターレットも新しいものに変更された。旧フィルターターレットは装置内に使用可能な状態で設置したまま、新しい撮像装置に付属のフィルターターレットが CCD カメラの直前に配置された。このフィルターターレットには 50mm 四方のフィルターを計 7 種設置でき、フィルターの交換は CCD カメラの制御ソフトウェア上で行うことができる。

3. 残像特性

新撮像素子を MINT に搭載し試験観測を行ってきた中で、FLI PL23042-1-B には残像が出現することが判明した。この残像は Residual Bulk Image (RBI) という名前で知られているもので、チップのシリコンウェハとエピタキシャルウェハの境界部分に信号が蓄積・放出されることで発生する (Janesick 2001)。RBI はいわゆる「空読み出し」を行っても除去できるものではなく、一度蓄積された信号は時間の経過とともに少しずつ

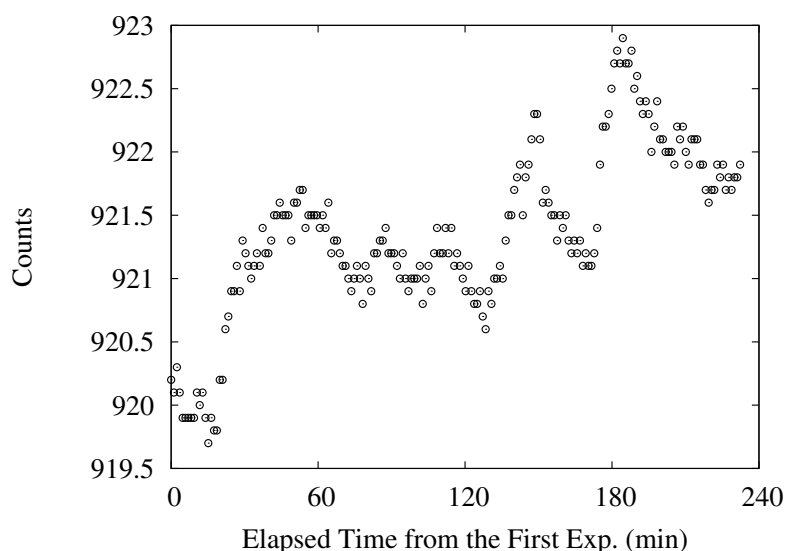


Fig. 1. 新撮像装置のダークカウントの変動。

放出される。従って、一度 RBI が出現すると以後の積分で残像がしばらく出現し続ける。解決策として、カメラに残像補正機能を付加することが考えられる。これは、ウェハ間のギャップに蓄積された信号を取り除くものではなく、各積分の前にギャップ部分の信号を飽和させることで、常にチップ全面に一定の残像が残るようにする機能である。この機能により、実質残像の影響なく観測を行うことができるようになる。この機能を使用するためには読み出し基盤の交換が必要で、これ以外の方法で RBI を取り除く方法は現状存在しないと考えられる。

読み出し基盤の交換を行わずに科学的データを取得するためには RBI がどの程度残存するかなどの特性を把握することが重要であるため、この洗い出しを行った。表面照射型の CCD では、RBI は CCD を冷やせば冷やすほど、また短波長の光ほど出現しにくいというのが一般的である (Janesick 2001)。FLI PL23042-1-B の冷却性能は「室温マイナス 60」であるため、冬季は -50 ~ -60 までの冷却が可能である一方、夏季は -30 での運用が限界であるため、安定運用温度は -30 に設定している。そのため、-30 に冷却した際の残像特性を評価した。評価の為にデータは、初めに任意のカウント数のフラットフレーム (CCD に一様の光を当て、チップの感度ムラを導出するための画像) を取得したのち、60 秒積分のダークフレーム (カメラのシャッターを閉じた状態で積分した画像) を数時間撮り続けるという方法で取得した。解析は IRAF を用いてダークフレームの中心 300 ピクセル四方の平均カウントを算出し、それより残像の変動を導出した。データは 2012 年 12 月 21 日から 1 月 28 日の間で、CCD カメラを MINT にマウントした状態で取得した。

3-1. バイアスレベルの安定性

残像特性を評価している中で、バイアスレベルが変動していることが判明した。バイアスとは、撮像装置のシャッターを閉じ、最短の積分時間 (0 秒) で撮像して得られる画像である。バイアスフレームを取得する際は光が当たっていないが、読み出しノイズや CCD カメラによるかさ上げにから、カウントは 0 にならない。一定温度環境下では、バイアスレベルはほぼ一定の値で安定していることが理想的である。

残像評価を行うために 10000 カウント程度のフラットフレームを取得した後、60 秒積分のダークフレー

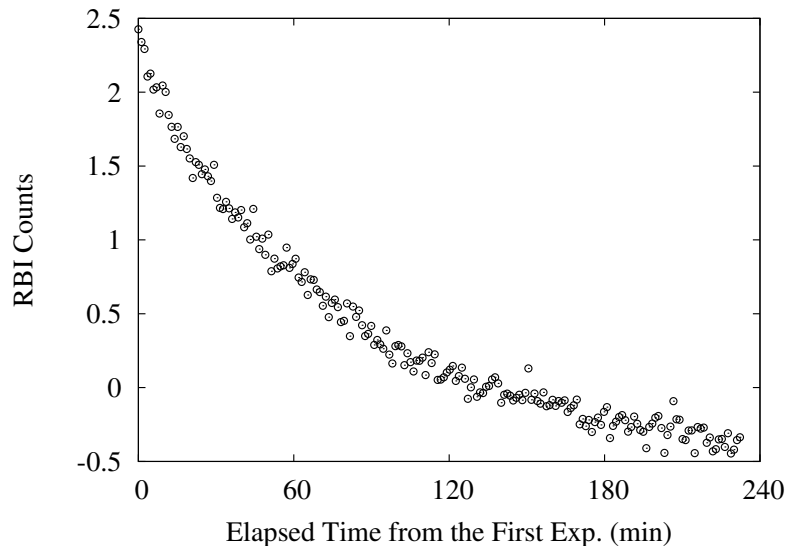


Fig. 2. Fig.1 と同様のデータにオーバースキャン処理を施したもの。残像が出ているため、取得開始直後のカウントが高くなっている。

ムを撮り続けた。データ取得日は2012年12月23日で、フラットフレームは夕方6時頃に取得した。その後のダークフレームは、この日西はりま天文台で行われた冬の大観望会中に取得したデータである。このデータから、ダークフレームのカウントがばらつくことが分かった (Fig. 1)。ダークフレームのレベルは4時間の間に3カウントほど変動している。ダークフレーム取得時はシャッターが閉じているため、光は入りこんでいる可能性はない。また、CCDの冷却温度は-30 に設定しており、安定的に冷却できているため、温度変動によりダークフレームの値が変動しているとも考えにくい。さらに、望遠鏡を天頂に向けたまま、同じようにデータを取得した際にはこのような変化は起こらないことが分かった。従って、望遠鏡からのノイズを受けてしまっている可能性が高い。この一連のデータを取得した時は、観望会で木星を追尾していたときであるため、望遠鏡が動くことに起因するノイズが付加されていると考えられる。

望遠鏡のどの部分が稼働している際にノイズを拾いやすいかを検証するために、同じように60秒積分のダークフレームを撮りながら、望遠鏡の可動部分を順番に動かした。その結果、望遠鏡の方位軸及び高度軸を動作させている際に、ダークレベルが上昇することが分かった。それ以外の部分を動作させた際のダークレベルの変動はなかった。

現在 MINT と望遠鏡の間の絶縁がほとんどできていないため、絶縁対策を行うことでこのようなダークレベルの変動は除去できると考えられる。また、MINTの新撮像装置は、画像の両端に50ピクセル幅のオーバースキャン領域がある。この領域の平均値を画像全体から差し引くことで、ノイズによるダークレベルの変動を除去することが可能である。Fig. 2は、Fig. 1で使用したデータと同様のデータで、オーバースキャン処理をした際のカウントの変動で、不規則なばらつきが無くなっていることが分かる。従って、MINTで取得したデータを解析する際は、まず初めにオーバースキャン処理を行う必要がある。ここで、最初の積分ではカウントが高く、徐々にカウントが減少しているのは、残像の変動である。

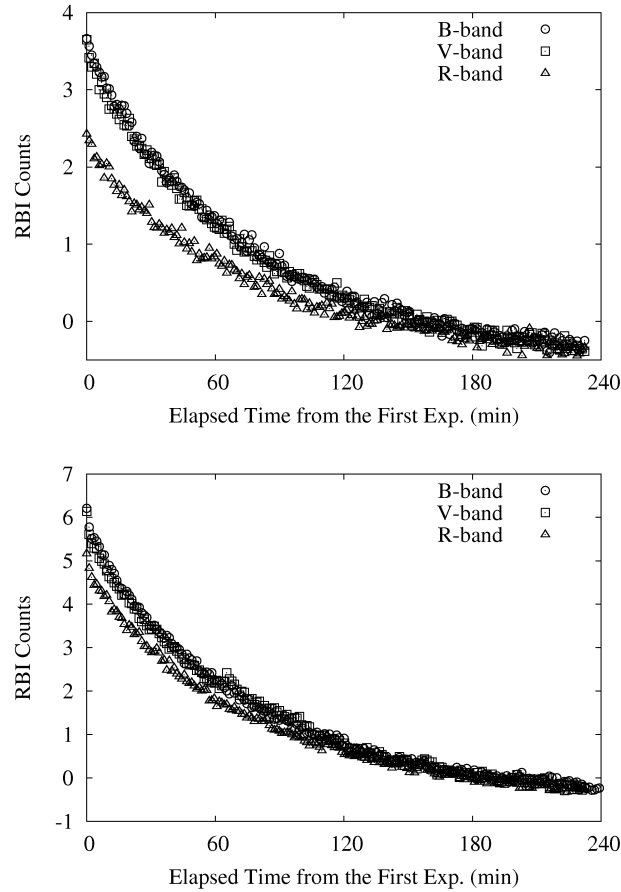


Fig. 3. (上): 各バンドで 10000 カウントのフラットフレームを取得した後の残像の減衰。(下) 各バンドで 20000 カウントのフラットフレームを取得した後の残像の減衰。

3-2. 残像の波長依存性

Janesick (2001) は、RBI には波長依存性があり、400nm などの短波長では RBI はほとんど出現せず、近赤外 (1000nm) に行くに従い増加すると言及している。そこで、FLI PL23042-1-B の RBI の波長依存性を検証した。約 10000 カウントのフラットフレームを撮影し、その直後から 60 秒積分したダークフレームを約 4 時間取得した。この際、Johnson-Cousins の *B*、*V*、*R* フィルタをそれぞれ用いて、残像の波長依存性を導いた。また、同様の方法で、約 20000 カウントのフラットを取得した後の残像評価も行った。

この結果、短い波長 (*B* バンド) ほど、残像が残りやすいことが分かった (Fig. 3)。この結果が、直前のフラットフレームのカウントの差に起因していないかを調べた。それぞれの評価で使用したフラットフレームのカウントは 10000 カウントと 20000 カウントでそろえているが、実際のフラットフレームの中心 300 ピクセル四方の平均値は以下のとおりである。

10000 カウントで揃えたフレーム: $B = 10150$ $V = 10720$ $R = 9200$

20000 カウントで揃えたフレーム: $B = 20130$ $V = 20500$ $R = 19920$

(バイアス込、バイアスレベルはそれぞれ ~ 920)

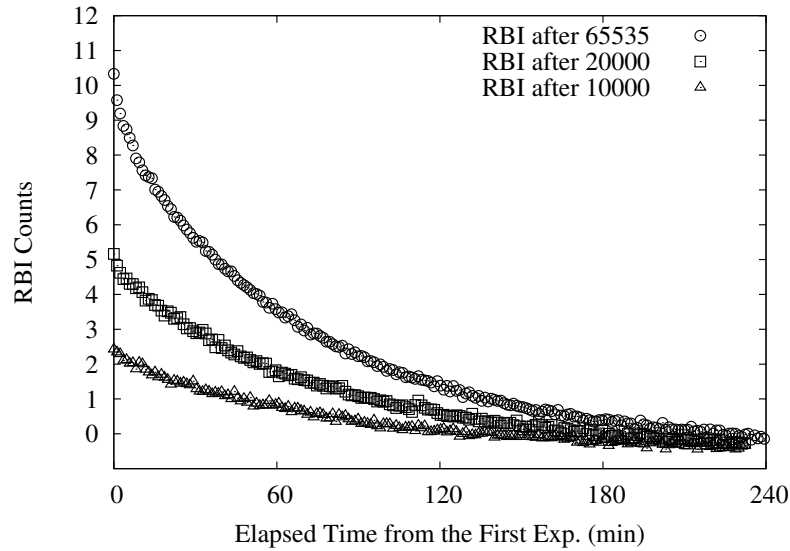


Fig. 4. オブジェクトフレームのカウントとその後の残像の関係。

10000 カウント、20000 カウントそれぞれで R バンドのカウントが低い、バンド間のフラットフレームのカウントの割合は、 R バンドの残像と他のバンドの残像との割合よりも小さい。従って、 R バンドの残像量が少ないことは、フラットフレームのカウント差に起因しているとは考えにくい。

この傾向は、Janesick (2001) で言及していた波長依存性とは逆の結果である。ただし、Janesick (2001) で述べられている波長依存性は表面照射型の CCD の場合で、短波長の光子は CCD の depletion region ですべて受け止められ、それより先にあるシリコンウェハとエピタキシャルウェハのギャップには到達しないためであると説明している。e2V CCD230-42 は裏面照射型であるため、表面照射型の RBI とは異なった特性を示している可能性がある。

3-3. カウントと残像の相関

撮られたオブジェクトフレームのカウントと残像の相関を導くために、様々なカウントのフラットフレーム後にダークフレームを取得した。検証のためのフラットフレームのカウントは、65535 カウント (サチュレーション)、20000 カウント、10000 カウントに設定した。フィルタは R バンドを使用した。その結果が Fig. 4 である。フラットフレーム取得直後のダークフレームに残っている残像量を比較した時、その割合はフラットフレームのカウント量の割合と一致しない。この結果から、CCD のギャップに溜まる信号が CCD のチップよりも先に飽和するか、残像量とカウント量に線形性がない可能性がある。ただし、およその平均として、 R バンドで 60 秒間積分した場合、残像の量は直前のフレームの 0.02% 程度であると言える。また、残像量は RBI の性質上、積分時間に比例すると考えられるので、例えば 300 秒積分を行うと直前のフレームの 0.1% の残像が現れると推測される。なお、この残像の減衰は指数関数でフィットすることができ、その関数は残像量に依らず同じで、残像の半減期はおよそ 50 分である (Fig. 5)。

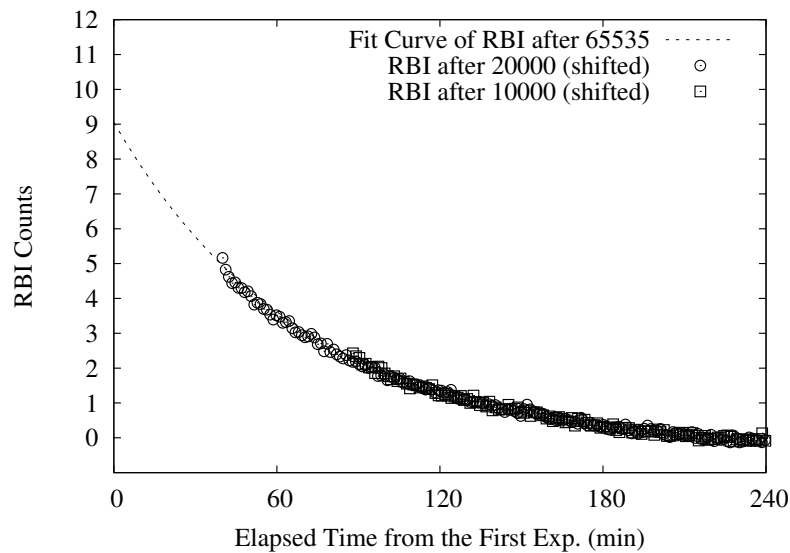


Fig. 5. 残像の減少傾向の比較。点線はサチュレーション後の残像の減衰を示しており、10000 カウント、20000 カウントのフレーム後の残像の減り方はこの関数に一致する。

3-4. CCD チップ面での RBI 残存性の差異

CCD のチップ面の場所によって RBI の残存性が異なるかを評価した。CCD 全面がサチュレーションを起こすように露光し、その後の RBI の量がどのように変化していくかを調べた。その結果、画像上のどの場所でも同程度の残像が出現し、残像が無くなるまでの時間も等しかった。従って、CCD のどの場所でも同程度の残像が現れる。

4. まとめ

なゆた望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられている可視光多波長撮像装置 MINT に対し、新しい撮像素子を取り付け、さらに MINT の筐体を改良した。新しい CCD カメラによって視野が $10.9' \times 10.9'$ に拡大され、筐体の改良により、望遠鏡のノミナル焦点で結像できるようになった。新 CCD カメラには望遠鏡の方位軸及び高度軸の稼働に起因するノイズが写り込むが、オーバースキャン処理を行うことでこの変動を取り除いて解析を行うことができる。

このカメラを用いてオブジェクトフレームを撮影すると残像が写る。この残像は CCD チップの構造に起因するものであり、読み出し回路などを調整して取り除くことができない。残像には波長依存性があり、短波長の光ほど残像が現れやすい。また、オブジェクトのカウント数と直後の残像量には線形性がない。残像は指数関数的に減少し、その半減期は約 50 分である。この残像を除去する方法はないが、各積分の前に常に同程度の残像が出るような処理を施すことで、安定的に観測を行うことが可能になる。

《参考文献》

Janesick J. R. 2001, in Scientific Charge-Coupled Devices, SPIE Press

尾崎忍夫 2006, 兵庫県立西はりま天文台公園年報, 第 15 号, p.6.