

京都大学大学院理学研究科附属天文台技報
Technical Reports from Kwasan and Hida Observatories
Graduate School of Science, Kyoto University
Vol.3-1

飛騨天文台太陽観測用カメラのノイズ特性評価及び比較
Characterization of noises of cameras used for solar observations
at Hida Observatory

大井 瑛仁^{*1}、阿南 徹^{*1}、佐野 聖典^{*1}、一本 潔^{*1}、永田 伸一^{*1}

2015 年 8 月 28 日

^{*1} 京都大学理学研究科附属天文台

概要

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) では、偏光観測を用いた電場測定などの新しいプラズマ診断手法の開拓を目的として、可視光から近赤外の広い波長帯にある任意のスペクトル線を偏光分光観測できるシステムの開発が進められている。新しいプラズマ診断手法を開拓するためには短時間で高い偏光測定精度を実現する観測が必要であり、より量子効率が高く読み出しノイズが低い検出器が望まれる。現在、DST では偏光分光観測のために3つの検出器 (浜松ホトニクス社製 ORCA-Flash4.0、Allied Vision Technologies 社製 Prosilica GE1650、Xenics 社製 XEVA640) が用いられている。私たちは3つのカメラの性能 (量子効率、読み出しノイズ、コンバージョンファクターなど) を評価・比較し、波長帯毎にどの検出器が偏光分光観測に有用であるか調査した。

In order to open a new window of plasma diagnostics by using spectropolarimetry, a universal spectropolarimeter was developed on the Domeless Solar Telescope (DST) at Hida observatory, which provides the full Stokes vector of any spectral regions in visible and near infrared. Since the spectropolarimetric observation requires high photometric accuracy achieved in a short duration, we need a photo detector with high quantum efficiency and low noise.s Three kinds of detectors (ORCA-Flash4.0 manufactured by Hamamatsu Photonics K. K., Prosilica GE1650 manufactured by Allied Vision Technologies Co., and XEVA-1.7-640 manufactured by Xenics Co.) are used on the spectropolarimeter at Hida observatory. We evaluated and compared performances of the three detectors (e.g. dark noise, readout noise, conversion factor to digital numbers, and photometric accuracy at various count level), and assess the best detector for effective spectropolarimetric observations in each wavelength range.

1 序論

太陽観測では、空間－空間または波長－空間方向に対する光強度の分布を 2 次元検出器でデジタル信号として記録したものを基に観測対象の物理情報を診断する。また、偏光観測では偏光情報を偏光変調器を用いて光強度の変調に変換し、その光強度の変調を測定することで偏光情報を取得する。いずれにしても、太陽観測において、より光の強度に対する測定精度が高い（ノイズが小さい）検出器を用いることは、観測対象の物理情報を診断するうえで重要である。

京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡（DST、Nakai & Hattori 1985）に、偏光観測による新しいプラズマ診断手法の開拓を目的とした可視光から近赤外の広い波長帯にある任意のスペクトル線を偏光分光観測できるシステムが開発された（Anan et al. 2012）。この偏光観測システムを用いて、ハンレ効果とゼーマン効果を用いた彩層磁場診断手法や電場測定手法の開拓（Anan et al. 2014）などが行われている。これらの手法を実際の観測に適用するためには、観測対象のダイナミクスを時間分解し、微小な偏光信号の違いを検出する必要があり、短時間で高い偏光測定精度を実現する観測が求められる。

現在、DST では偏光分光観測のために 3 つの検出器、Allied Vision Technologies 社製 Prosilica GE1650、浜松ホトニクス社製 ORCA-Flash4.0、Xenics 社製 XEVA640、が用いられている（表 1）。3 つの検出器は

表 1 検出器

品名	Prosilica GE1650	ORCA-Flash4.0	XEVA-640
撮像素子	CCD	CMOS	InGaAs
画素数 (pix)	1600×1200	2048×2048	512×640
画素サイズ (μm)	7.4×7.4	6.5×6.5	20×20
読み出し速度 (フレーム/秒)	32	100	25
A/D 出力 (bit)	12	16	14
波長帯 (nm)	320 - 900	380 - 900	900 - 1700
冷却温度	室温	-10°C	-20°C

それぞれ CCD カメラ、CMOS カメラ、InGaAs カメラであり、基本的には各ピクセルに入射した光がフォトダイオードによって電荷に変換され、さらにアンプで蓄積された電荷を電圧信号に変換することで出力される。CMOS カメラは、画素ごとにアンプを持っており従来の CMOS カメラは画素ごとの固定パターンが画質を低下させる要因であったが、ORCA-Flash4.0 の固定パターンは無視できるほど小さい。よって、測光誤差の主な要因としては、

- 光子数の統計的変動であるフォトンノイズ
- 熱雑音によって検出器内に発生するダークノイズ
- 電荷を電圧に変換するときに発生する読み出しノイズ

である。短時間で高い偏光測定精度を実現するためには、フォトンノイズ、ダークノイズ、読み出しノイズが小さいカメラが良い。光子を電荷に変換する効率を量子効率と呼び、量子効率が高い検出器は光子を多く記録することができ、フォトンノイズも小さくすることができる。また、電荷を数値 (DN) に変換する際の 1 DN あたりの電子数を本稿ではコンバージョンファクターと呼ぶ。

私たちは3つのカメラの性能（ダークノイズ、読み出しノイズ、コンバージョンファクター）を測定し比較した。同時にフォトンノイズを比較し、量子効率の違いを議論した。そして、波長帯毎にどの検出器が偏光分光観測に有用であるか調査した。本調査結果は偏光分光観測に限ったものではなく様々な撮像において有用な情報である。第2章ではダーク特性の測定方法と結果、第3章では測光精度の測定方法と結果について述べ、第4章でまとめる。

2 ダーク特性：ダークレベル、読み出しノイズ、熱雑音、ホットピクセル

2.1 測定方法

検出器の受光面を遮光し5枚の画像を取得する。次に5枚の画像を平均することでダークレベルを得た。1枚目と2枚目、2枚目と3枚目、3枚目と4枚目、4枚目と5枚目の差分を求め、それぞれの差分の平均自乗平方根（RMS）からダークに含まれるノイズを求めた。ダークノイズは、露出時間に依存しない読み出しノイズと、露出時間 ϵ のルートに比例し温度 T に依存する熱雑音によって構成される。ダークノイズの分散 σ_d^2 は読み出しノイズの分散 σ_r^2 と熱雑音の分散 σ_T^2 の和であり、

$$\sigma_d^2 = \sigma_r^2 + \sigma_T^2 = \sigma_r^2 + C_T^2 \epsilon \quad (1)$$

として表せる。ここで C_T は熱雑音 $\propto \sqrt{\epsilon}$ における比例定数であり温度に依存する（熱雑音係数と呼ぶ）。露出時間（表2）とダークレベル及びダークノイズとの関係について調査し、式(1)でフィティングすることで読み出しノイズ σ_r と熱雑音係数 C_T を求める。熱雑音の温度依存性については調査していない。科学観測時では観測直後または直前にダークを取得することで、温度の違いによるダーク特性の違いを抑える。

表2 ダークノイズ調査において設定した露出時間

検出器	露出時間（秒）
Prosilica GE1650	4.0e-05, 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0
ORCA-Flash4.0	5.0e-05, 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0
XEVA-640	1.0e-06, 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0

2.2 ダーク特性

図1左はORCA-Flash4.0のダークレベルの露出時間依存性を示す。ダークレベルの平均値と中間値は露出時間に依存せず100DN程度である。最大値はホットピクセルの値を示している。図1右はORCA-Flash4.0の露出時間に対するダークノイズ（DNのRMS）である。露出時間が長くなるにつれてダークノイズは増加している。読み出しノイズ及び熱雑音はそれぞれ1.2（DN）、0.2（DN s^{-1/2}）であった。

図2左はGE1650のダークレベルの露出時間依存性を示す。露出時間が長くなるにつれて平均値と中間値が上昇している。最大値はホットピクセルの値を示している。図2右はGE1650の露出時間に対するダークノイズである。ダークノイズも露出時間が長くなるにつれて増加している。読み出しノイズ及び熱雑音はそれぞれ1.7（DN）、0.2（DN s^{-1/2}）であった。

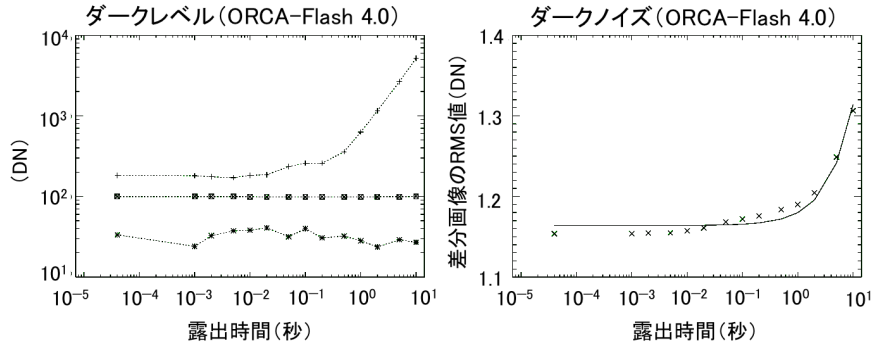


図 1 左：ORCA-Flash4.0 の露出時間に対するダークの最大値 (+)、平均値 (×)、中間値 (□)、最小値 (*)。右：ORCA-Flash4.0 の露出時間に対するダーク差分の RMS。右図の実線は式 (1) によるフィッティング結果。

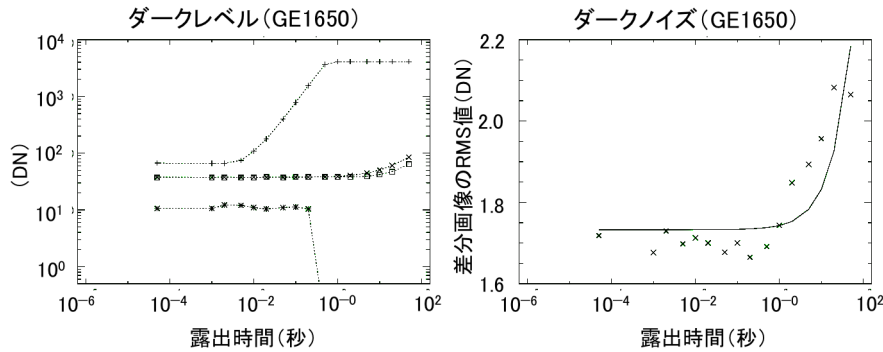


図 2 左：GE1650 の露出時間に対するダークの最大値 (+)、平均値 (×)、中間値 (□)、最小値 (*)。右：GE1650 の露出時間に対するダーク差分の RMS。右図の実線は式 (1) によるフィッティング結果。

図 3 左は XEVA640 のダークレベルの露出時間依存性を示す。露出時間に対して平均値と中間値が上昇している。最大値はホットピクセルの値を示している。図 3 右は XEVA640 の露出時間に対するダークノイズである。ダークノイズも露出時間が長くなるにつれて増加している。XEVA640 の仕様書にある露出時間設定範囲 ($1\ \mu\text{s}$ から $100\ \text{ms}$) における式 (1) によるフィッティングから求めた読み出しノイズ及び熱雑音はそれぞれ $1.8\ (\text{DN})$ 、 $3.1\ (\text{DN s}^{-1/2})$ であった。

図 4 は、検出器それぞれのダーク信号のヒストグラムである。主成分がダークレベルを、大きな DN 値に伸びる分布がホットピクセルの分布を表す。露出時間が長くなるにつれて、ホットピクセルの数が増加し、値も増加していることが分かる。ORCA-Flash4.0 と GE1650 では主成分の分布が露出時間に関係なくほぼ一定である。一方で、XEVA640 では露出時間が長くなるにつれて、主成分の値が大きくなっている。これは、XEVA640 のダークレベルにおいて暗電流の寄与が大きいことを示す。

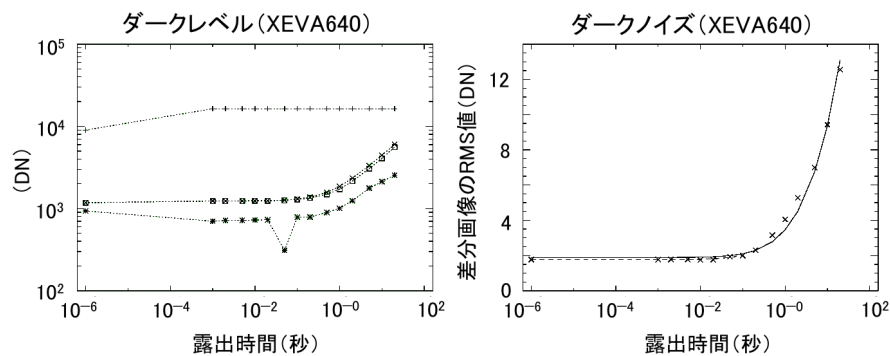


図 3 左：XEVA640 の露出時間に対するダークの最大値 (+)、平均値 (×)、中間値 (□)、最小値 (*)。右：XEVA640 の露出時間に対するダーク差分の RMS。右図の実線は式 (1) によるフィッティング結果。右図の破線は XEVA640 の仕様書にある露出時間設定範囲 ($1\mu\text{s}$ から 100ms) における式 (1) によるフィッティング結果。

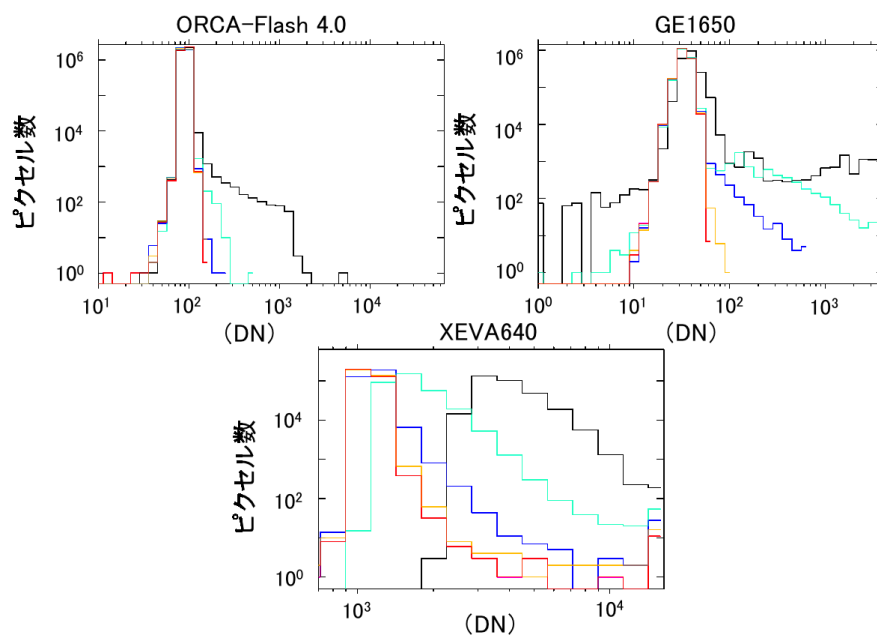


図 4 ORCA-Flash4.0、GE1650、XEVA640 のダーク信号のヒストグラム。黒、水色、青、黄色、赤はそれぞれ露出時間 10 秒、1 秒、0.1 秒、0.01 秒、0.001 秒。

3 測光精度

3.1 コンバージョンファクターの測定方法

コンバージョンファクターを調べるために、DST に設置された垂直分光器にメタルハライドファイバー照明装置（シグマ光機 IMH-250）を用いて光を入射した。カメラ素子に当たる光をよりフラットにするために、入射位置にレンズを設置した。入射した光を垂直分光器で分光し、ある特定の波長の光を分光器の焦点に設置したカメラで撮像した。図 5 は、測定実験のセットアップの様子である。



図 5 セットアップ。左図は銀色のファイバーでメタルハライドファイバー照明装置（シグマ光機 IMH-250）の光を DST の垂直分光器に入射している様子。右図は垂直分光器の焦点面に設置されたカメラ（ORCA-Flash4.0）である。

各カメラについて表 3 に示した各条件の下 100 枚連続撮像した。撮像したフレームから 2 枚（img₁、img₂）を使用し、ダークフレームを引いた後各ピクセルについて、平均と差分を求めた。視野を光量が一定と考えられる小さな領域に分割して点数を稼ぎ、各領域について DN の平均と分散を求めた。表 4 はカメラの視野と分割した視野および点数の関係である。

DN の平均と分散、コンバージョンファクターと読み出しノイズの関係を図 6 に示す。あるピクセルに蓄積された電子数を N_e とすると、 $DN = N_e/a$ 、DN の平均 $\overline{DN} = \overline{N_e}/a$ 、DN の分散 $(DN - \overline{DN})^2 = (N_e - \overline{N_e})^2 a^{-2}$ である。フォトンノイズがポアソン分布をとることから、光量が十分にある場合は、

$$\frac{\sqrt{(DN - \overline{DN})^2}}{\overline{DN}} = N_e^{-1/2} = (\overline{DN} a)^{-1/2}, \quad (2)$$

となり、従ってコンバージョンファクター（ a ）は（DN の平均）/（DN の分散）である（図 6）。

一方で、入射光量がゼロの極限となる y 切片（ b ）は読み出しノイズ（ $= \sqrt{b}$ ）に対応する。読み出しノイズはカメラの微弱な光に対する検出限界を示す。本章におけるメタルハライドファイバー照明装置を用いた測光精度の調査では参考値として読み出しノイズを求める。本調査における検出器の読み出しノイズはダーク特性から測定した値とする。

表 3 測定条件

波長	次数	フィルター	光量	露出時間 (ms)
ORCA-Flash4.0				
393 nm	1	なし	露出時間 1 秒で $\sim 6e4$ DN に調整	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000
630 nm	1	なし	同上	同上
854 nm	1	RG780	同上	同上
10830 nm	1	RM90	光源の最大出力	10,20,50,100,200,500,1000,2000,5000,10000
GE1650、カメラゲイン: 0				
393 nm	1	なし	ORCA-Flash4.0 に同じ	0.35, 0.7, 1.75, 3.5, 7, 17.5, 35, 70, 175, 350
630 nm	1	なし	同上	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000
854 nm	1	RG780	同上	2, 4, 10, 20, 40, 100, 200, 400, 1000, 2000
10830 nm	1	RM90	光源の最大出力	10,20,50,100,200,500,1000,2000,5000,10000
XEVA640				
1083 nm	1	RM90	光源の最大出力	8, 16, 40, 80, 160, 400, 800, 1600, 4000, 8000

表 4 カメラ視野の分割

カメラ	視野 (pix ²)	分割した視野 (pix ²)	点数
ORCA-Flash4.0	2048 × 2048	32 × 32	4096
GE1650	1600 × 1200	40 × 40	1200
XEVA640	640 × 512	32 × 32	320

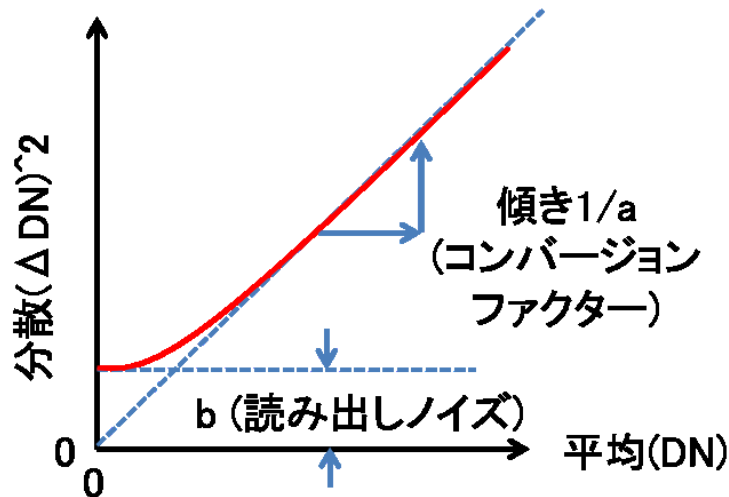


図 6 デジタルナンバーの平均と分散の関係 (赤線、平均 - 分散図と呼ぶ)。コンバージョンファクターは光量が十分あるときの傾きの逆数、読み出しノイズは光量がゼロのときの分散に対応する。

測定では露出時間を変化させることで入射光子数を変化させ、各露出時間及び各分割視野のデータを用いて各波長における DN の平均と分散の相関プロットを作成し、その相関プロットを 1 次方程式で最小自乗法フィットすることにより a を求めた。

図 7 は、ORCA-Flash4.0 の測定例である。平均値の分布と分散値の分布が一致することから、ポアソン分布に従って DN を得ていることが窺える。また、素子の面で出来る干渉縞が確認できる。図 8 は、GE1650 の測定例である。平均値分布の輪郭に沿って分散の増加が見られるため、ある特定の DN で分散の大きさが変化していると考えられる。図 9 は、XEVA640 の測定例である。十分な DN を出力している (10000 DN 以上) データであるが、平均の増減に対応した分散の増減が確認できない。これは、ホットピクセルの影響が卓越しているためと考えられる。

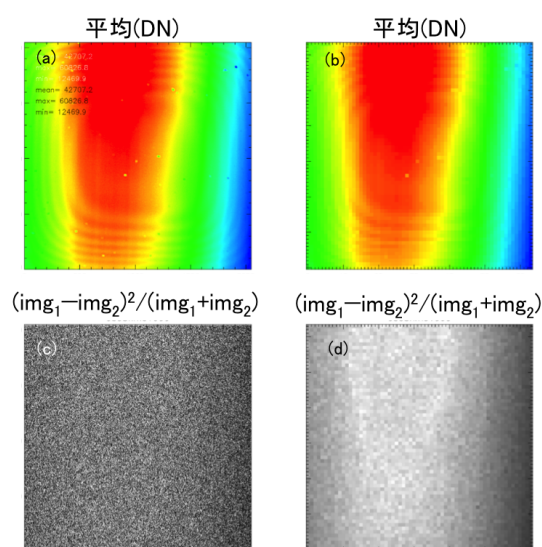


図 7 ORCA-Flash4.0 の 393nm、露出 1000m 秒の (a) 平均、(b)32 x 32 pix² 毎にビニングした平均、(c) 分散、(d)32 x 32 pix² 毎にビニングした分散の図。平均の図は紫色から赤色へ、分散の図は黒色から白色へ値が大きい。

3.2 コンバージョンファクター

図 10 は ORCA-Flash4.0 の平均 - 分散図である。DN が十分大きい場合 (図 10(a) - (c))、 a の平均は $0.99 \text{ e}^-/\text{DN}$ である。図 11 と図 13 の左は ORCA-Flash4.0 の 1083nm 及び 393nm における平均 DN - 分散図である。それぞれの Y 切片 b は 4.3 DN^2 及び 6.9 DN^2 であることから、読み出しノイズは $a\sqrt{b}$ として、それぞれ 1.9 e^- 及び 2.5 e^- である。一方で、ダーク特性から測定した ORCA-Flash4.0 の読み出しノイズは 1.2 e^- である。これはカタログ値 1.3 e^- とほぼ等しい。ダーク特性から求めた読み出しノイズと飽和電荷量 $0.99 \times 2^{16} = 64880 \text{ e}^-$ (カタログ値 30000 e^-) より、ダイナミックレンジ (飽和電子数 : 読み出しノイズ) は $54067 : 1$ である (カタログ値は $23000 : 1$)。熱雑音係数 C_T は $0.2 (\text{e}^- \text{ s}^{-1/2})$ である。

図 12 は、GE1650 の平均 - 分散図である。DN が十分大きい場合 (図 12(a) - (c)) の a の平均は $8.7 \text{ e}^-/\text{DN}$ である。393nm、630nm、854nm では平均 DN が 3000DN を超えると分散が小さくなる傾向があった。1000 - 3000 DN で分散は平均に対し滑らかでない局所ピークを示す傾向があった。図 13 は ORCA-Flash4.0 と

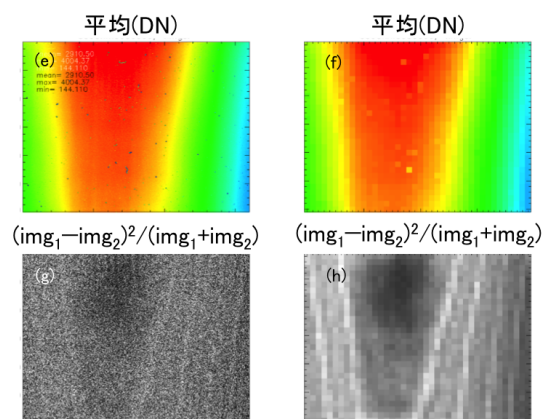


図 8 GE1650 の 393nm、露出 360m 秒の (e) 平均、(f) 40 x 40 pix² 毎にピニングした平均、(g) 分散、(h) 40 x 40 pix² 毎にピニングした分散の図。平均の図は紫色から赤色へ、分散の図は黒色から白色へ値が大きい。

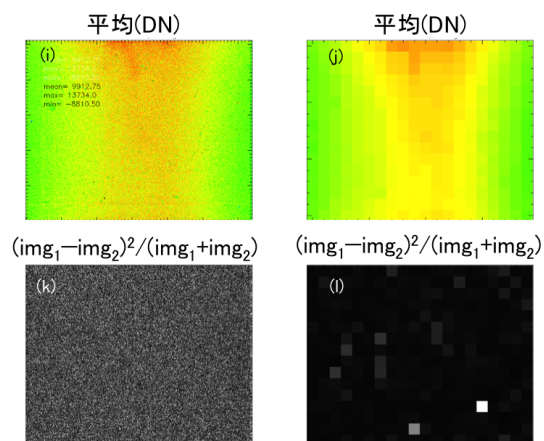


図 9 XEVA640 の 1083nm、露出 5000m 秒の (i) 平均、(j) 32 x 32 pix² 毎にピニングした平均、(k) 分散、(l) 32 x 32 pix² 毎にピニングした分散の図。平均の図は紫色から赤色へ、分散の図は黒色から白色へ値が大きい。

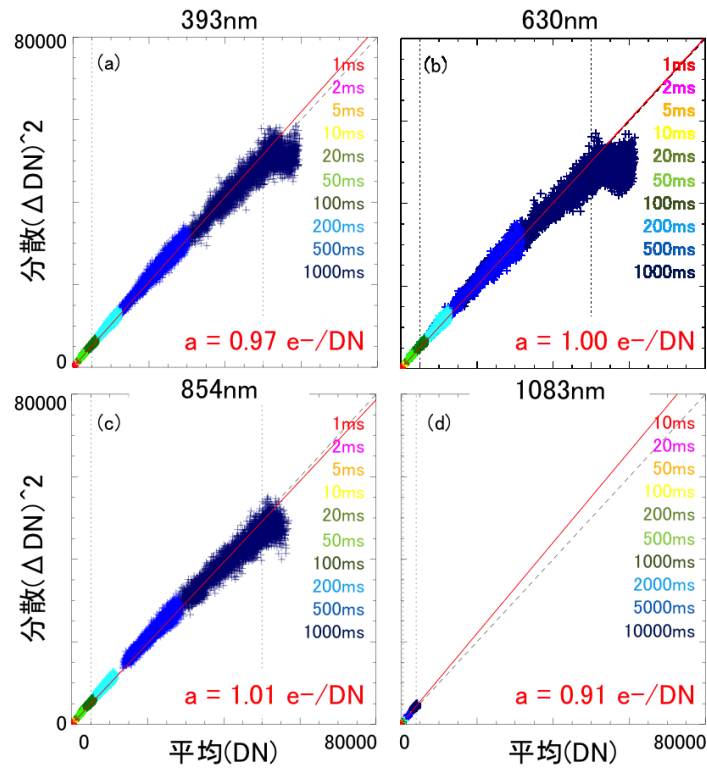


図 10 ORCA-Flash4.0 の平均 - 分散図、(a)393nm、(b)630nm、(c)854nm、(d)1083nm。点の色はデータの露出時間を、破線は傾き 1 を、点線はコンバージョンファクター a を求めるのに使用した範囲 ((a) - (c) は 5000 - 50000 DN、(d) は 1000 - 3000 DN) を、赤実線は最小二乗法で求めた a を示す。1083nm は感度が無いため、他と比べ DN が小さい。

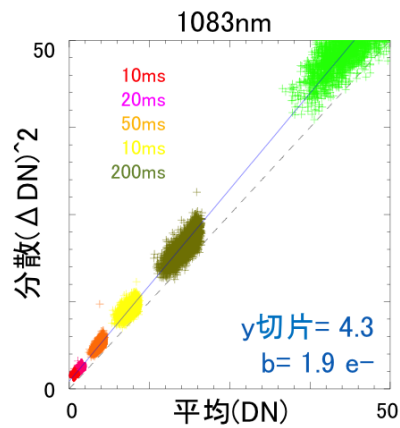


図 11 ORCA-Flash4.0 の 1083nm の平均 - 分散図。点の色はデータの露出時間を、破線は傾き 1 を示す。

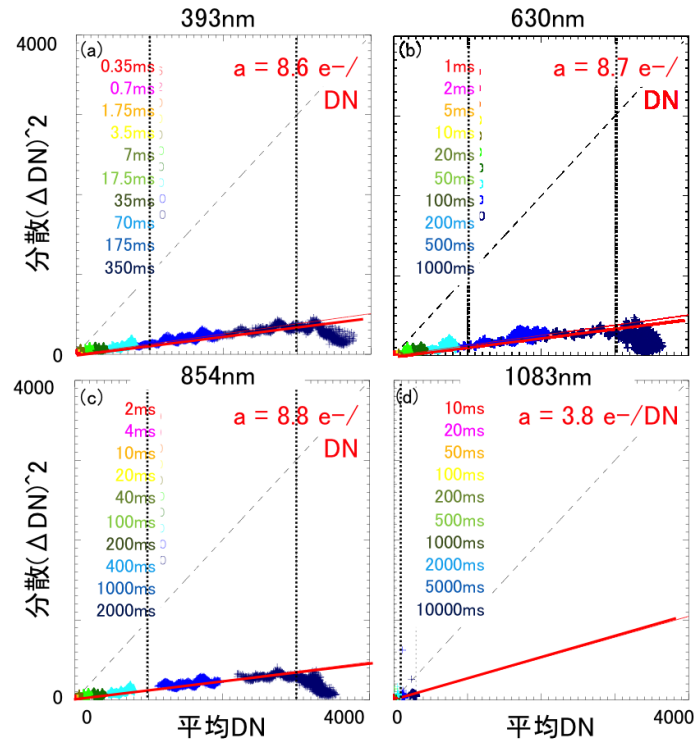


図 12 GE1650 の平均 – 分散図、(a)393nm、(b)630nm、(c)854nm、(d)1083nm。点の色はデータの露出時間を、破線は傾き 1 を、点線はコンバージョンファクター a を求めるのに使用した範囲 ((a) – (c) は 1000 – 3000 DN、(d) は 100 – 300 DN) を、赤実線は最小二乗法で求めた回帰線を示す。1083nm は感度が無いため、他と比べ DN が小さい。

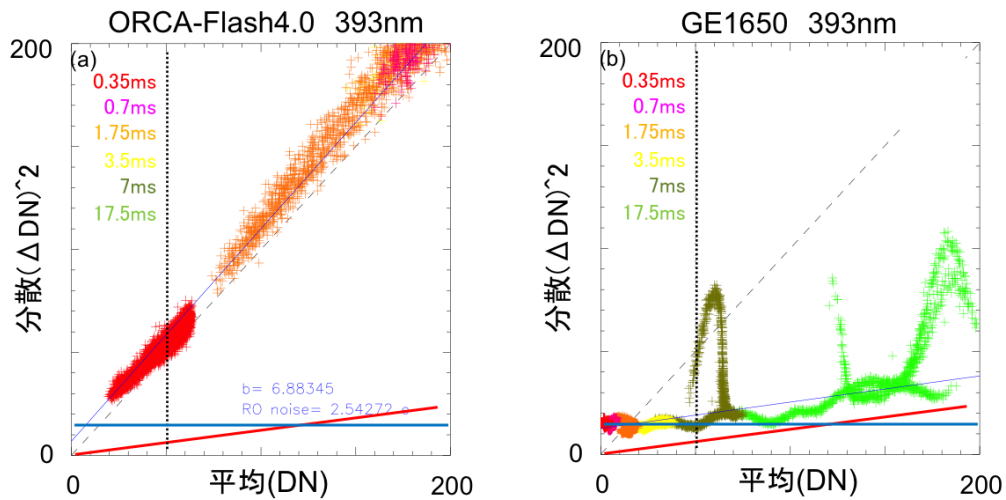


図 13 ORCA-Flash4.0 (a) 及び GE1650 (b) の 393nm における平均 – 分散図、0 – 200 DN の範囲。点の色はデータの露出時間を、破線は傾き 1 を、点線は読み出しノイズ b を求めるのに使用した範囲 (0 – 50 DN) を、赤実線は 393nm の a を、青実線は最小二乗法で求めた b を示す。

GE1650 の 393nm における平均 – 分散図の原点近傍を拡大したものである。GE1650 の平均 – 分散図における回帰線の Y 切片が 14.5 DN^2 であるので読み出しノイズは 33 e^- (3.8 DN) である。一方で、ダーク特性から測定した GE1650 の読み出しノイズは 15.1 e^- である。これはカタログ値 20 e^- に対して小さな値となった。ダーク特性から測定した読み出しノイズと飽和電荷量 $8.7 \times 2^{12} = 35635 \text{ e}^-$ より、ダイナミックレンジは $2360 : 1$ である。熱雑音係数 C_T は $1.74 (e^- s^{-1/2})$ である。

図 14 は XEVA640 の 1083nm の平均 – 分散図である。コンバージョンファクターは $289 \text{ e}^-/\text{DN}$ である。読み出しノイズは 994 e^- (3.4 DN) である。一方で、ダーク特性から測定した XEVA640 の読み出しノイズは 520.2 e^- である。これはカタログ値 2023 e^- に対して小さな値となった。ダーク特性から測定した読み出しノイズと飽和電荷量 $289 \times 2^{14} = 4734976 \text{ e}^-$ より、ダイナミックレンジは $9102 : 1$ である (カタログ値は $2500 : 1$)。熱雑音係数 C_T は $895.9 (e^- s^{-1/2})$ である。

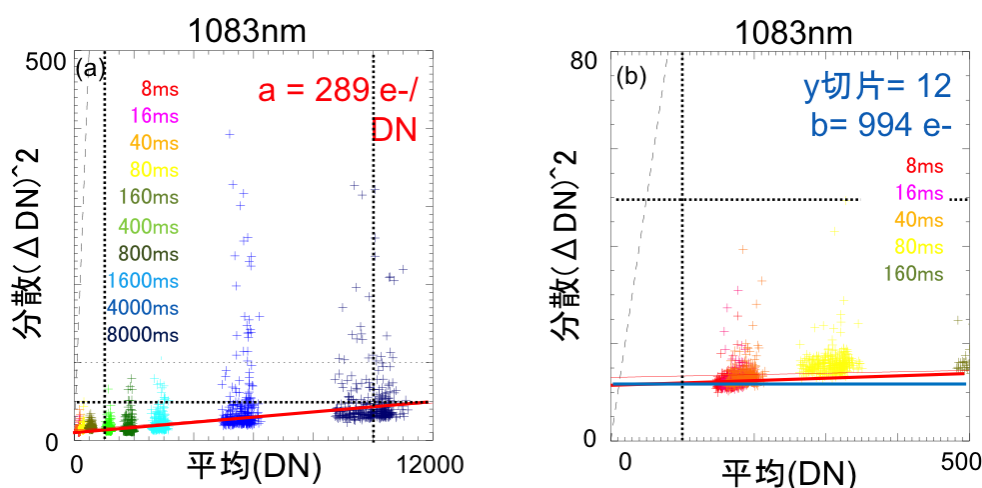


図 14 XEVA640 の 1083nm の平均 – 分散図、(a)0 – 12000 DN の範囲、(b)0 – 500 DN の範囲。点の色はデータの露出時間を、破線は傾き 1 を、点線はコンバージョンファクター a と読み出しノイズ b を求めるのに使用した範囲 (a ; 1000 – 10000 DN, 0 – 50 DN^2 , b ; 0 – 100 DN) を、赤実線は 1083nm の a を、青実線は最小二乗法で求めた b を示す。平均 DN が大きくなっても読み出しノイズと同程度だったため、読み出しノイズ b を切片とした傾き a を求めた。

3.3 測光精度の比較

図 15 は、393nm で同じ光量における ORCA-Flash4.0 と GE1650 の露出時間に対する蓄積電子数 (左) と測光精度 (右) を比較したものである。それぞれの量子効率カタログ値より ORCA-Flash4.0 が 24%、GE1650 が 44% である (図 A-1、図 A-2)。同じ露出時間で比較すると、GE1650 の方が量子効率が高いためより多くの電子を得ており十分な露出をかけた場合ノイズも小さい。一方で十分に光を受けていないと読み出しノイズが効いているためノイズが大きい。これより、393nm の観測では、十分な光量がある場合、GE1650 を用いる方がランダムノイズを小さくできる。尚、ORCA-flash4 は RMS/平均 vs. 露出時間の傾き (-0.5) よりフォトンノイズで精度がほぼ決まっていることがわかる。

図 16 は、630nm における ORCA-Flash4.0 と GE1650 の比較である。それぞれの量子効率は、ORCA-Flash4.0 が 70%、GE1650 が 34% である (図 A-1、図 A-2)。ORCA-Flash4.0 の方が量子効率が高いためよ

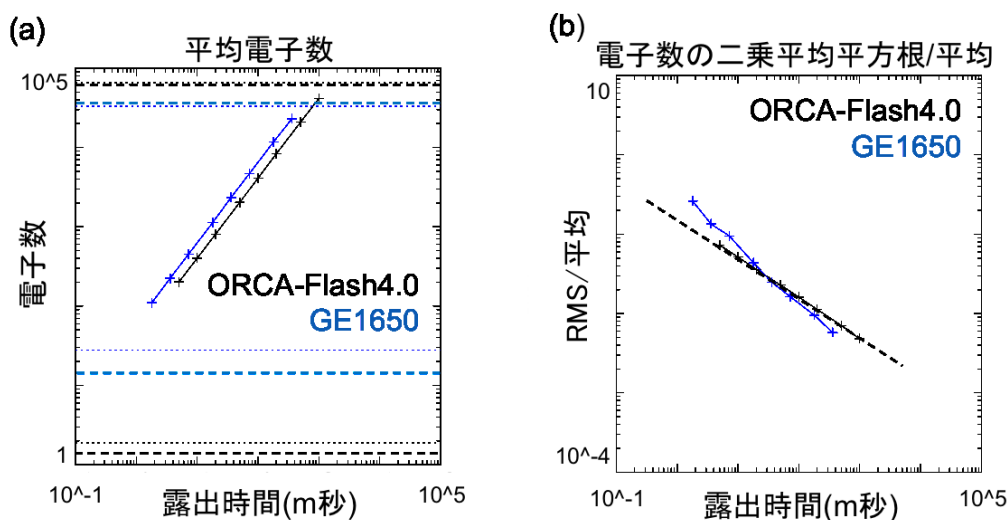


図 15 393nm の ORCA-Flash4.0 と GE1650 の比較、(a) 露出時間 – 平均電子数図、(b) 露出時間 – 電子数の二乗平均平方根/平均。黒色は ORCA-Flash4.0 を、青色は GE1650 を、(a) の破線は読み出しノイズの電荷量と飽和電荷量を、(b) の破線は傾き-0.5 を示す。

り多くの電子を得ておりノイズも小さい。GE1650 では十分に光を受けていないと読み出しノイズが効いているためノイズが大きくなる。よって、630nm の観測は、ORCA-Flash4.0 を用いる方がランダムノイズを小さくできる。

図 17 は、854nm における ORCA-Flash4.0 と GE1650 の比較である。それぞれの量子効率、ORCA-Flash4.0 が 30%、GE1650 が 6% である (図 A-1、図 A-2)。ORCA-Flash4.0 の方が量子効率が高いためより多くの電子を得ておりノイズも小さい。GE1650 では十分に光を受けていないと読み出しノイズが効いているためノイズが大きくなる。854nm の観測は、ORCA-Flash4.0 を用いる方がランダムノイズを小さくでき、光量が低い場合 GE1650 よりも一桁ほど短い時間で同じ精度を達成することができる。

図 18 は、1083nm における ORCA-Flash4.0、GE1650、XEVA640 の比較である。それぞれの量子効率は、ORCA-Flash4.0 が 3%、GE1650 が 0.5% (推定)、XEVA640 が 80% である (図 A-1、図 A-2、図 A-3)。XEVA640 は他と比べ 2 桁以上多くの電子を得ておりノイズも 1 桁以上小さい。よって、1083nm の観測は、XEVA640 が適している。

4 まとめ

私たちは、3 種類のカメラに光を入射させ、デジタルナンバーの平均と分散の関係から、カメラの特性を示すコンバージョンファクターを調べた (表 5)。また、ダークノイズの露出時間依存性から読み出しノイズと熱雑音及びホットピクセルの頻度分布を求めた。

可視光域では、ORCA-Flash4.0 は $1/\sqrt{}$ 電子数でノイズが決まることが確認できた。光量が十分でない場合、GE1650 は読み出しノイズが支配的になることが確認できた。これらの光量が十分であった場合、1 フレームでのランダムノイズは 10^{-2} 以下を見込めることが確認できた。

近赤外線域では、XEVA640 が他と比べ 2 桁以上の電子を得られることが確認できた。XEVA640 の読み

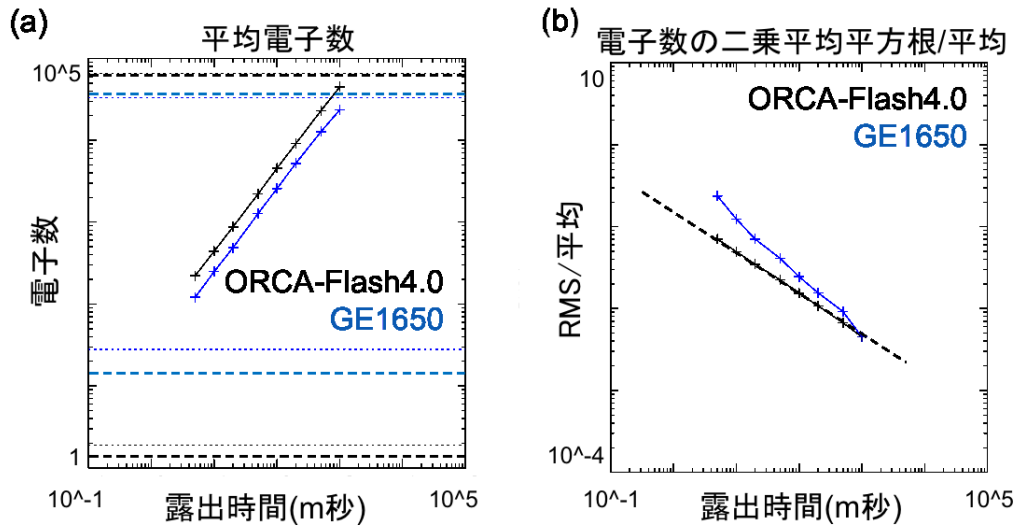


図 16 630nm の ORCA-Flash4.0 と GE1650 の比較、(a) 露出時間 – 平均電子数図、(b) 露出時間 – 電子数の二乗平均平方根/平均。黒色は ORCA-Flash4.0 を、青色は GE1650 を、(a) の破線は読み出しノイズの電荷量と飽和電荷量を、(b) の破線は傾き-0.5 を示す。

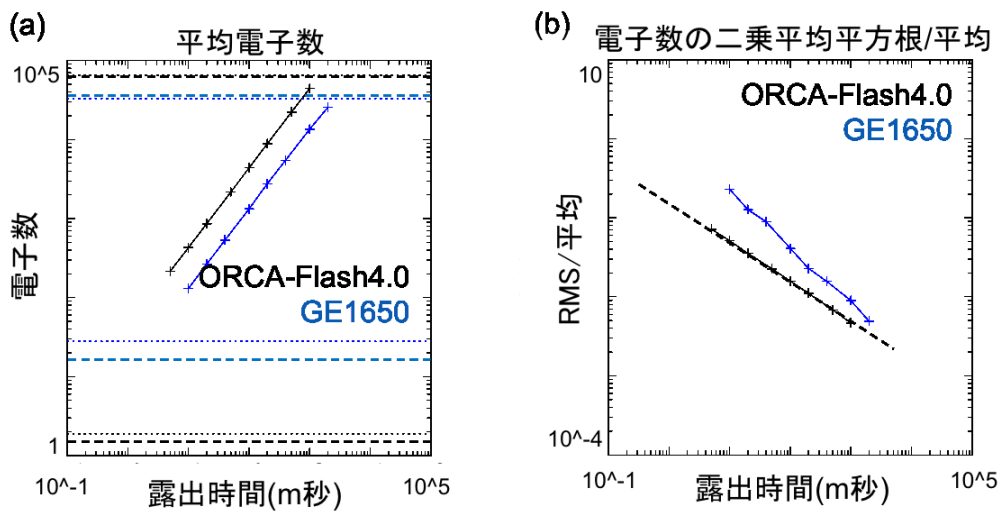


図 17 854nm の ORCA-Flash4.0 と GE1650 の比較、(a) 露出時間 – 平均電子数図、(b) 露出時間 – 電子数の二乗平均平方根/平均。黒色は ORCA-Flash4.0 を、青色は GE1650 を、(a) の破線は読み出しノイズの電荷量と飽和電荷量を、(b) の破線は傾き-0.5 を示す。

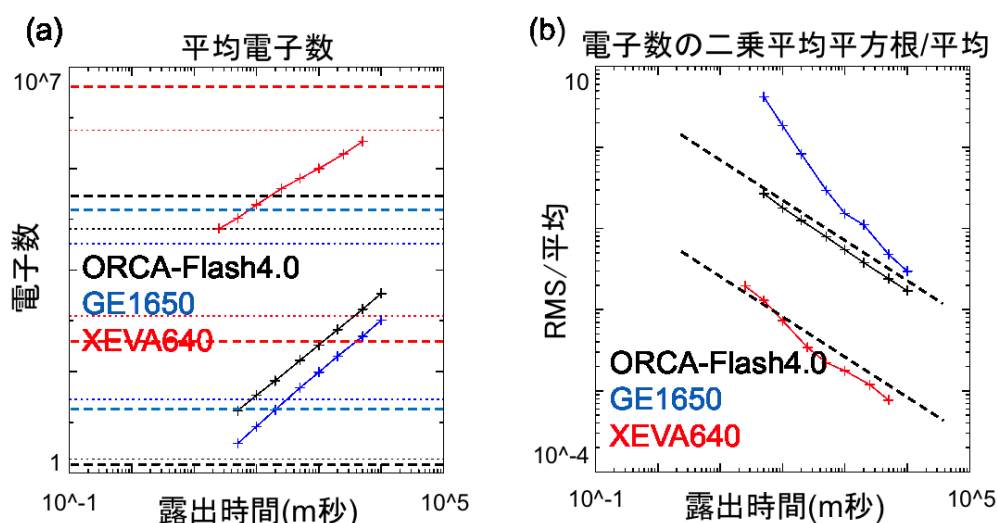


図 18 1083nm の ORCA-Flash4.0、GE1650、XEVA640 の比較、(a) 露出時間 – 平均電子数図、(b) 露出時間 – 電子数の二乗平均平方根/平均。黒色は ORCA-Flash4.0 を、青色は GE1650 を、赤色は XEVA640 を、(a) の破線は読み出しノイズの電荷量と飽和電荷量を、(b) の破線は傾き-0.5 を示す。

表 5 まとめ

カメラ	コンバージョン ファクター a (e^-/DN)	読み出しノイズ n_r (e^-)	熱雑音 C_T ($e^- s^{-1/2}$)	飽和電荷量 (e^-)	ダイナミックレンジ
ORCA-Flash4.0	0.99	1.2 (1.3)	0.2	64880 (30000)	54100 : 1 (23000:1)
GE1650	8.7	15.1 (20)	1.74	35640	2360 : 1
XEVA640	289	520 (2023)	895.9	4735000 (5057500)	9100 : 1 (2500:1)

注：() 内はカタログ値

出しノイズが大きい、光量が十分であった場合、1 フレームでのランダムノイズは 10^{-3} 以下を見込めることが確認できた。

ORCA-Flash4.0 は 53000 DN 以上で分散が小さくなる傾向があった。GE1650 は特定の DN で分散の大きさが増加する傾向があった。

謝辞

本実験を行い報告書をまとめた大井瑛仁氏は 2014 年 9 月 12 日に突然他界しました。本稿は阿南徹が中心となって彼のレポートをまとめなおしたものです。心よりご冥福をお祈りします。

参考文献

- [1] Anan, T., Ichimoto, K., Oi, A., Kimura, G., Nakatani, Y. & Ueno, S. 2012, SPIE, 8446, 1C
- [2] Anan, T., Casini, R. & Ichimoto, K. 2014, ApJ, 786, 94
- [3] Nakai, Y. & Hattori, A. 1985, Memoirs of Faculty of Science, Kyoto University, Series of Physics, Astrophysics, Geophysics and Chemistry, 36, 385

付録 量子効率

図は ORCA-Flash4.0、GE1650、XEVA640 の量子効率のカatalog値である。

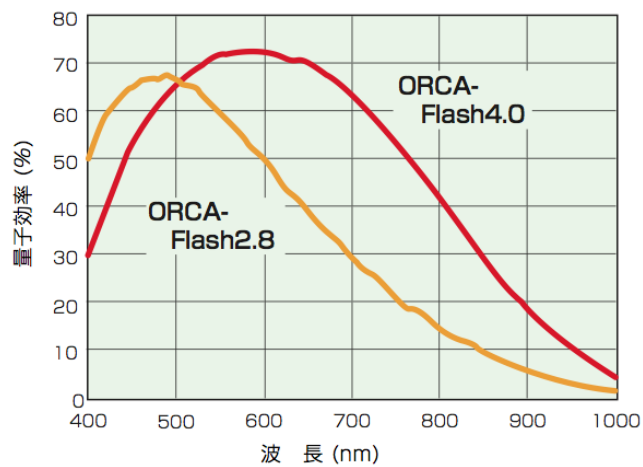


図 A-1 ORCA-Flash4.0 の量子効率。ORCA-Flash4.0 技術資料 2011 年 12 月版より。

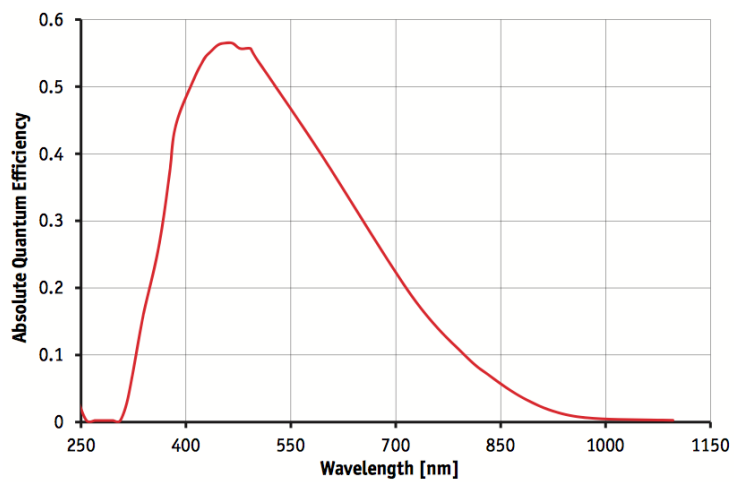


図 A-2 GE1650 の量子効率。Technical Manual、AVT GigE Vision Cameras、V2.0,2、02 October 2013 より。

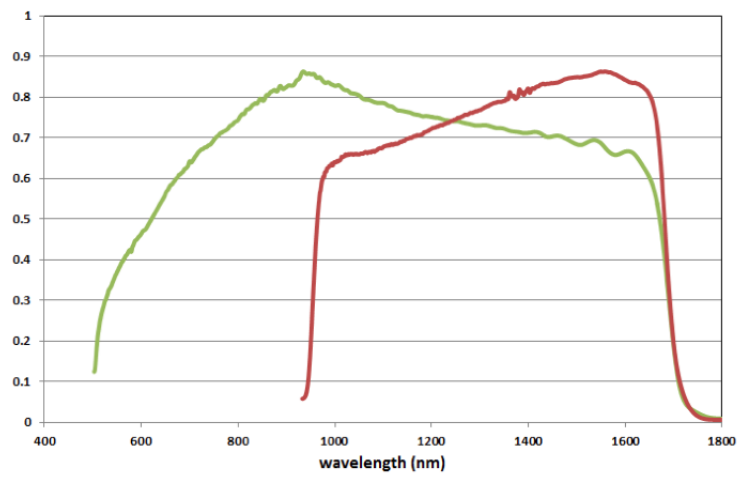


図 A-3 XEVA640 の量子効率（赤線）。User Manual、Xeva FPA Cameras、ENG-2013-UMN002-R002 より。