

京都大学大学院理学研究科附属天文台技報
Technical Reports from Astronomical Observatory
Graduate School of Science, Kyoto University
Vol.6-2

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で使用する
近赤外カメラのノイズ特性評価および比較
Characterization of near-infrared cameras used for
solar observations at Hida Observatory

山崎大輝¹、黄于蔚¹、橋本裕希¹、松田有輝¹、白戸春日¹、
Denis P. Cabezas¹、永田伸一¹、上野悟¹、一本潔¹

令和4年12月20日

¹京都大学理学研究科附属天文台

概要

京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡 (DST) では、彩層磁場診断を目的とした近赤外線偏光分光観測装置の開発が進められてきた。彩層磁場診断には、スペクトル線に現れるハンレ効果やゼーマン効果を観測する必要があり、そのためには近赤外域における高い偏光測定精度 ($\sim 10^{-4}$) の観測が求められる。本研究では、飛騨天文台が所有する赤外線カメラ (FLIR 社製の FLIR-A6261、Allied vision Technologies 社製の Goldeye G033 SWIR) についてダーク特性や測光精度などの性能を比較する実験を行った。人工光を導入した実験の結果、コンバージョンファクターは FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR でそれぞれ 4.38、3.40 (e^-/DN) と得られた。また、露光時間が 100 msec 以上では Goldeye G033 SWIR の方が FLIR-A6261 よりも若干高い SN を達成することがわかったが、両者の SN に大きな差はなかった。さらに、電子数で比較したダークノイズについては露光時間が 200 msec 以上の場合は FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR は同程度の値を示し、より短い露光時間の場合は FLIR-A6261 の方が Goldeye G033 SWIR より小さい値を示した。加えて Goldeye G033 SWIR の方が FLIR-A6261 と比較して線形性区間が広く、FLIR-A6261 ではトリガー信号に対して時々露光開始に時間遅れが発生することが分かった。以上から総合的に判断すると、特に偏光変調の位相と振幅を適切に取得する必要のある偏光観測には、Goldeye G033 SWIR の方が適していると結論付けた。

We have developed a near infrared spectropolarimeter on the Domeless Solar Telescope at Hida Observatory aiming at diagnosing the chromospheric magnetic field in the solar atmosphere. In order to observe the Zeeman and Hanle effects to obtain the chromospheric magnetic field, high polarimetric sensitivity of less than 10^{-4} is required, and especially, for Zeeman diagnosis, near infrared observations are highly desired. In this study, we carried out several experiments to compare the performances of two infrared cameras: FLIR-A6261, and Goldeye G033 SWIR. As a result of our experiments with artificial light source, we found that the conversion factor of FLIR-A6261 and Goldeye G033 SWIR were 4.38 and 3.40 (e^-/DN), respectively. Goldeye G033 SWIR achieves slightly higher SN ratio in the case of exposure time of > 100 msec while there were no significant difference in SN ratio between these two cameras. The dark noise of FLIR-A6261 and Goldeye G033 SWIR show comparable values in the case of exposure time of larger than 200 msec. In the case of the shorter exposure time, the dark noise of FLIR-A6261 shows smaller value comparing to that of Goldeye G033 SWIR. In addition, we also found that Goldeye G033 SWIR has a wider range in linearity, and FLIR-A6261 sometimes shows time delay against the trigger signal for exposure. Comprehensively taking into account all these results, we concluded that the Goldeye G033 SWIR is more suitable, especially for polarimetric observations, which require high accuracy in detecting the phases and amplitudes of polarization modulation.

1 序論

太陽光球および彩層の物理量を診断するためには、可視光から近赤外線領域に形成される線スペクトルを高精度に取得することが重要である。京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡 (DST; Nakai & Hattori 1985) は、世界有数の高分散広帯域分光器を備えた観測装置である。DST では、近年新たに開発された可視光から近赤外の波長域での多波長同時偏光分光観測システム (Anan et al. 2012; Anan et al. 2018) によって、これまでハンレ効果やゼーマン効果を用いた彩層磁場診断手法の開発が進められてきた (Anan et al. 2014)。また、DST における偏光分光観測に用いる検出器の性能評価試験が行われ、主に彩層磁場診断に用いられる 10830 Å の観測には、飛騨天文台が偏光観測用に所有する 3 種類のカメラ Allied Vision Technologies 社製 Prosilica GE1650、浜松ホトニクス社製 ORCA-Flash4.0、Xenics 社製 XEVA-640 の内では、XEVA-640 が最も感度が高いことが報告されている (Oi et al. 2015)。

本研究では、新たに DST 偏光分光観測装置への導入を目的として、2 台の近赤外線カメラ、すなわち FLIR 社製の FLIR-A6261 と Allied vision Technologies 社製の Goldeye G033 SWIR について、ダーク特性および測光精度等の性能を評価し、Xenics 社製の XEVA-640 と比較を行った。下表 1 に、それぞれの仕様をまとめた。第 2 章ではダーク特性について、第 3 章ではバッドピクセルの時間変化について、第 4 章ではフレーム抜けについて、第 5 章では干渉縞について、第 6 章では FLIR-A6261 および Goldeye G033 SWIR の測光精度について、第 7 章では線形性について、それぞれの評価方法を示し得られた結果について議論する。

表 1: 性能表 (カタログより)

品名		XEVA-640	FLIR-A6261	Goldeye G033 SWIR
撮像素子		InGaAs	InGaAs	InGaAs
画素数	(pix)	640 × 512	640 × 512	640 × 512
画素サイズ	(μm)	20 × 20	15 × 15	15 × 15
電子シャッター		snapshot	snapshot	full frame shutter
読み出し速度	(fps)	25	180	301
A/D 出力	(bit)	14	14	14
波長帯	(nm)	1000-1700	1000-1700	1000-1700
量子効率	(%)	65 – 85	> 60	75 – 80 (下図 1 参照) ¹
冷却温度	(°C)	-20	+5, +20, +30 ²	-40 ~ +60 ³
飽和電子量	(ke^-)	~ 5000	~ 50 (medium gain)	84.8 (gain1)
ダークノイズ	(e^-)	2020	56 (medium gain)	53 (gain1)
制御インターフェース		Xeneth64.lib	bhpSDK*.dll	Vimba*.dll

¹ <https://www.alliedvision.com/en/camera-selector/detail/goldeye/c1-033-tec1/>

² 通常運用時の設定温度 20 °C

³ 通常運用時の設定温度 0 °C (冷却フィン 2 つを装着)

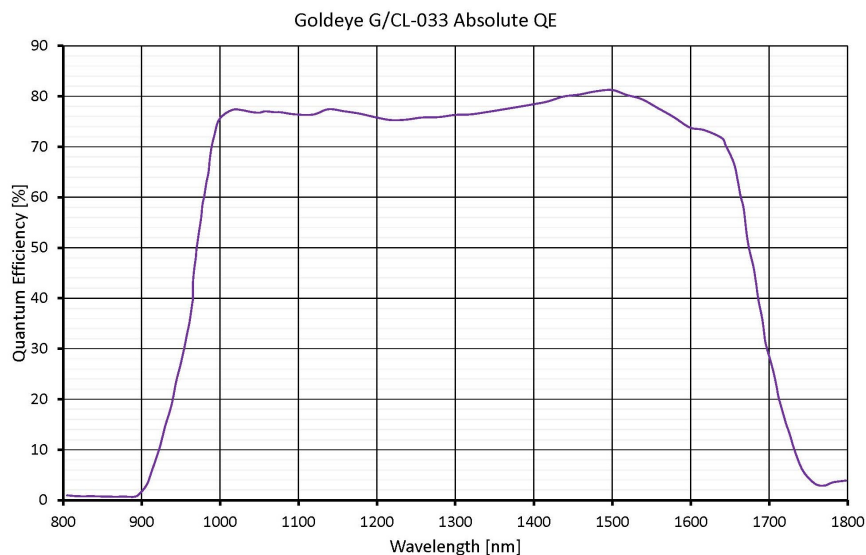


図 1: Goldeye G033 SWIR の量子効率 (カタログより)

2 ダーク特性評価: ダークレベル、読み出しノイズ、熱雑音

ダークノイズは、露光時間に依らない読み出しノイズと、露光時間 ϵ のルーツに比例し温度に依存する熱雑音にわけられる。つまり、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、以下のように表せる。

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

ここで、 C_T は熱雑音係数である。本実験では、露光時間とダークレベルおよびダークノイズの関係を調査する。

2.1 章には実験及び解析の手法についてを、2.2 章には通常運用に用いる単温度でのダーク特性の結果についてを、2.3 章には Goldeye G033 SWIR のダーク特性の温度依存性についてそれぞれ示す。ただし、FLIR-A6261 についてはセンサー温度 +5 °C での温度安定性が得られなかったため、ダーク特性の温度依存性の調査は行わなかった。また、本実験の手法については、European Machine Vision Association (EMVA) によるイメージセンサ、カメラ特性評価に関する標準規格 EMVA Standard 1288 Release 4.0 General¹の第 7 章も参照されたい。本稿 2.2 章に記載の単温度でのダーク特性、2.3 章に記載のダーク特性の温度依存性については、EMVA Standard 1288 Release 4.0 General の第 7.1 章と第 7.2 章にそれぞれ対応する。

¹<https://www.emva.org/standards-technology/emva-1288/emva-standard-1288-downloads-2/>

2.1 実験および解析手法

FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR の受光面をそれぞれ遮光し、FLIR-A6261 は 10 通りの異なる露光時間 (1, 2, 4, 8, 16, 40, 100, 200, 500, 1000 msec) で、Goldeye G033 SWIR は 9 通りの異なる露光時間 (4, 8, 16, 40, 100, 200, 500, 1000, 2000 msec) でそれぞれ、5 枚ずつダーク画像を連続で取得した。それぞれの露光時間について、取得された 5 枚のダーク画像の平均をとることで、ダークレベルを得た。また、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、それぞれの差分の二乗平均平方根 (root mean square: RMS) からダークに含まれるノイズを求めた。また、Goldeye G033 SWIR についてはセンサー温度を 0, +5, +10, +15, +20 °C に設定して、それぞれデータを取得した。

2.2 ダーク特性

図 2 に FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR のダーク特性を示した。ただし、いずれのカメラについてもセンサー温度が +20 °C の結果を示した。図 2(a,b) に示した通り、いずれの検出器についてもダークレベルは概ね露光時間の長さに応じて増加することが分かる。ただし、FLIR-A6261 については 1000 msec 以上では、受光面を遮蔽しても蓄積される電子量が飽和することが分かった。また、図 2(c,d) に示した通り、本実験における露光時間帯では、いずれの検出器についてもダークの分散は概ね露光時間に比例して増加している。さらに、式 (1) の表式を用いて、500 および 1000 msec を除く、8 通りの露光時間のデータについて、線形フィッティングを行った。その結果、センサー温度が +20 °C の時、読み出しノイズと熱雑音はそれぞれ、FLIR-A6261 については 9.7 DN と 128.3 DN · s^{-1/2}、Goldeye G033 SWIR については 27.0 DN と 49.7 DN · s^{-1/2} と得られた。また、図 2(c,d) の青線は、各露光時間で取得した 5 枚のダークについての視野内の平均値の標準偏差を示している。これをバイアス変動と呼ぶ。Goldeye G033 SWIR では、バイアス変動が FLIR-A6261 よりも顕著に見られることがわかった。Oi et al. (2015) によると、XEVA-640 については、0.001 から 100 msec の露光時間帯での同様の実験から、読み出しノイズと熱雑音としてそれぞれ、1.8 DN と 3.1 DN · s^{-1/2} が得られている。

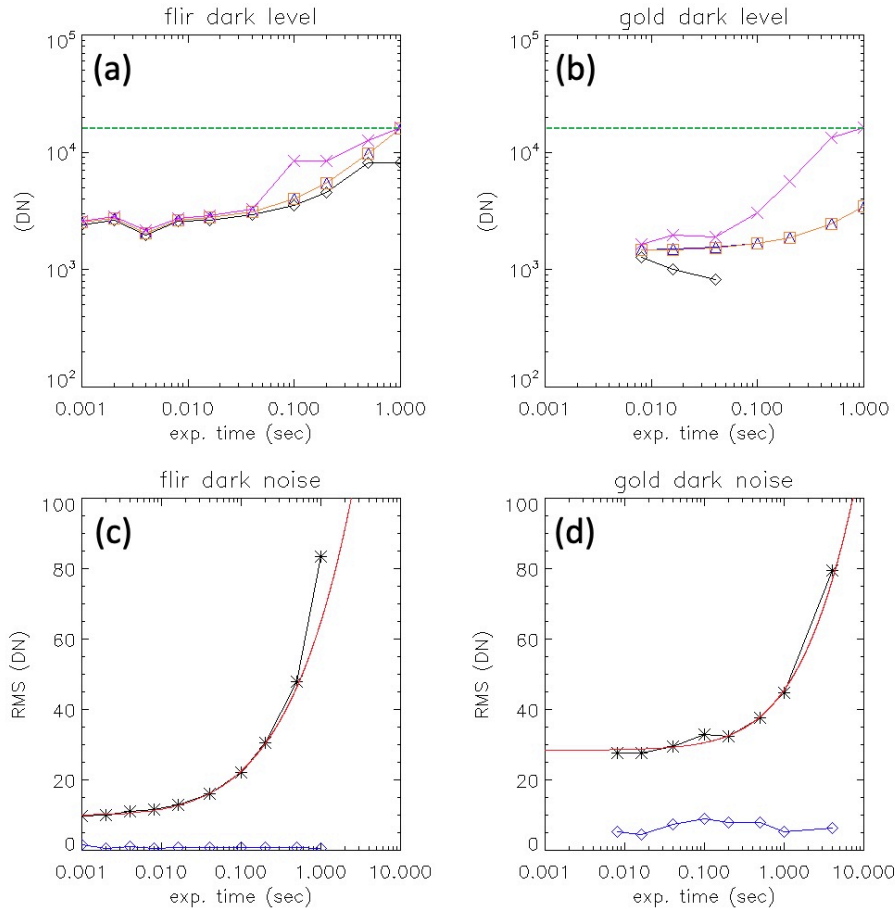


図 2: (a)FLIR-A6261 の露光時間に対するダークレベル、ピンク、オレンジ、青、黒はそれぞれ、各露光時間のダーク画像にける最大値、平均値、中央値、最小値を表している。緑点線は飽和レベル ($2^{14} = 16384$ DN)。 (b)Goldeye G033 SWIR の露光時間に対するダークレベル、色は (a) のそれらと同じ。 (c)FLIR-A6261 の露光時間に対するダークノイズ、赤実線は式 (1) によるフィッティング結果、青は視野内平均値の標準偏差である。 (d)Goldeye G033 SWIR の露光時間に対するダークノイズ、赤及び青は (c) のそれと同じ。

2.3 Goldeye G033 SWIR の熱雑音係数のセンサー温度依存性

Goldeye G033 SWIR はその仕様上、ペルチェ素子を用いた加熱冷却によってセンサー温度を -40 から $+60$ $^{\circ}\text{C}$ まで設定することができる。ただし冷却フィン 2 個をカメラケースに取り付けているが、 0 $^{\circ}\text{C}$ 以下の設定では温度が安定しないことがわかったため、本実験ではセンサー温度を $0, +5, +10, +15, +20$ $^{\circ}\text{C}$ に設定して、9 通りの異なる露光時間 (4, 8, 16, 40, 100, 200, 500, 1000, 2000 msec) でそれぞれ、100 枚ずつダーク画像を連続で取得した。各露光時間におけるダーク画像の差分の RMS を計算し、ダークノイズとみなした。式 (1) の表式を用いたフィッティングから、露光時間毎のダークノイズか

ら読み出しノイズと熱雑音係数をそれぞれ求めた。また、連続撮像 100 枚での視野内平均値の分散も求めた。図 3 にその結果を示し、表 2 にセンサー温度ごとの読み出しノイズと熱雑音係数の値をまとめた。読み出しノイズは、センサー温度によらず概ね 28 (DN) 程度の値を示し、熱雑音係数はセンサー温度が低いほど小さい値を示した。これより Goldeye について、露出時間が 50 msec を超えるあたりから冷却による熱雑音の低減効果が得られることがわかる。

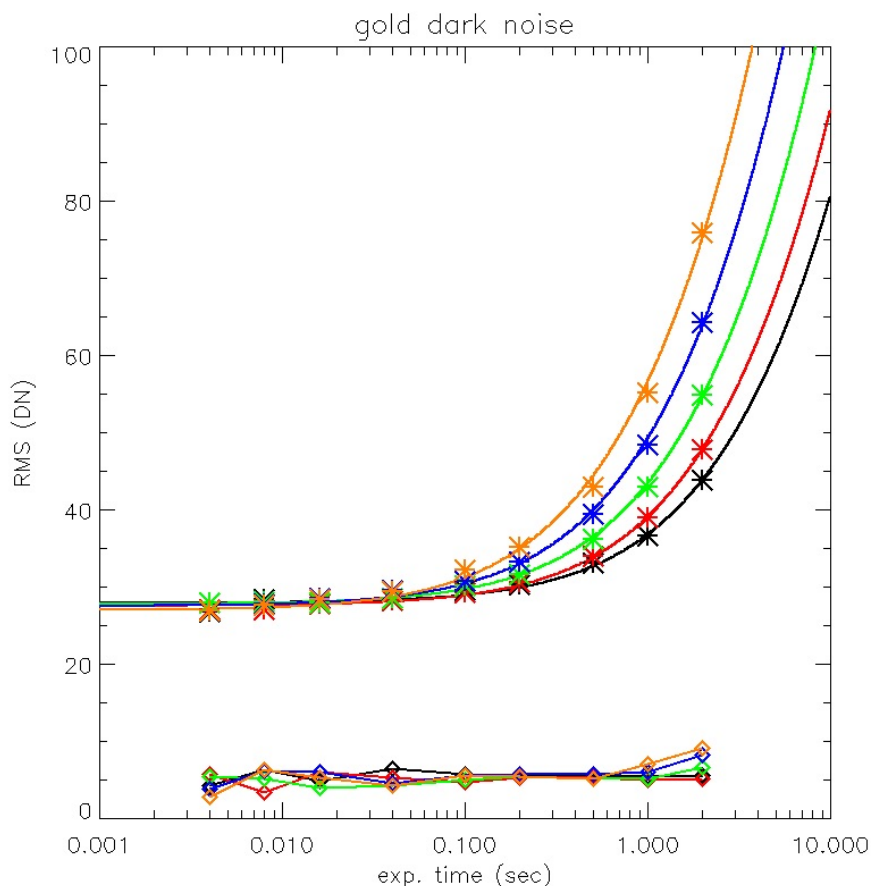


図 3: Goldeye G033 SWIR のダーク特性の温度依存性、* はダークノイズ、◇ は視野内平均値の分散、各プロットの色はセンサー温度に対応 (黒: 0 °C、赤: +5 °C、緑: +10 °C、青: +15 °C、橙: +20 °C)

3 バッドピクセルの時間変化とデータ欠損

検出器の連続撮像時の安定性を評価するため、以下の実験を行なった。FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR それぞれについて、受光面を遮蔽し、露光時間 15 msec で 200 枚連続を 1 セットとして、

表 2: Goldeye G033 SWIR のダーク特性の温度依存性

センサー温度	°C	0	+5	+10	+15	+20
読み出しノイズ	(DN)	27.9	27.5	27.8	27.5	27.0
熱雑音係数	(DN/s ^{1/2})	23.9	27.8	33.3	40.8	49.7

4 秒おきに 2 時間連続、計 1800 セット取得した。カメラ温度は FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR についてそれぞれ 20 °C と 0 °C に設定した。図 4(a,b) にそれぞれのカメラの各ダーク画像 200 枚 セット中の最小値、最大値、平均値を示した。(a) が FLIR-A6261 で (b) が Goldeye G033 SWIR の 結果であり、黒、赤、青線はそれぞれ各画像中の最大値、平均値、最小値である。図 4 (a,b) の黒線 から、FLIR-A6261、Goldeye G033 SWIR とともに 1 時間に数回、最大値が 1000 DN 程度大きくなる 様子が確認された。これは、バッドピクセルの時間変動に対応すると考えられる。バッドピクセルの 振る舞いについては、両カメラで有意な差は見られなかった。図 5 には、連続撮像時に視野内で最大 値をとるピクセルの座標を示した。(a,b) はそれぞれ、FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR に対応 し、赤、橙、黒プロットはそれぞれ 100 回以上、10 回以上 100 回未満、1 回以上 10 回未満最大値を 示した座標に対応している。FLIR が平均よりも 100DN 程カウントの高い示す「ホットピクセル」 が受光面全体に分布するのに対し、Goldeye は特定のピクセルでのみ最大値を示すことがわかった。 また、Goldeye では 360000(= 1800 × 200) フレーム中 15 フレームでデータ欠損 (値が 0 の領域) が 確認された。図 6 に、本実験で確認された Goldeye のデータ欠損発生時のダーク画像を示した。(a-j) には、21 セット目の 153 枚目、65 セット目の 183 枚目、93 セット目の 198 枚目、107 セット目の 186 枚目、511 セット目の 195 枚目、666 セット目の 197 枚目、779 セット目の 199 枚目、989 セッ ト目の 141 枚目、1110 セット目の 194 枚目の画像をそれぞれ示した。また (k-o) には、1481 セット 目の 0 枚目、195-199 枚目の画像をそれぞれ示した。図 7 にはそれぞれ図 6 に対応するデータ欠損発 生時の $x = 320$ での一次元プロットを示した。黒実線はデータ欠損が発生したダーク画像の一次元 プロット、赤実線はデータ欠損が発生したセットの 100 枚目の画像の一次元プロットをそれぞれ表し ている。本実験からはデータ欠損に関する再現性や規則性は見出せなかった。

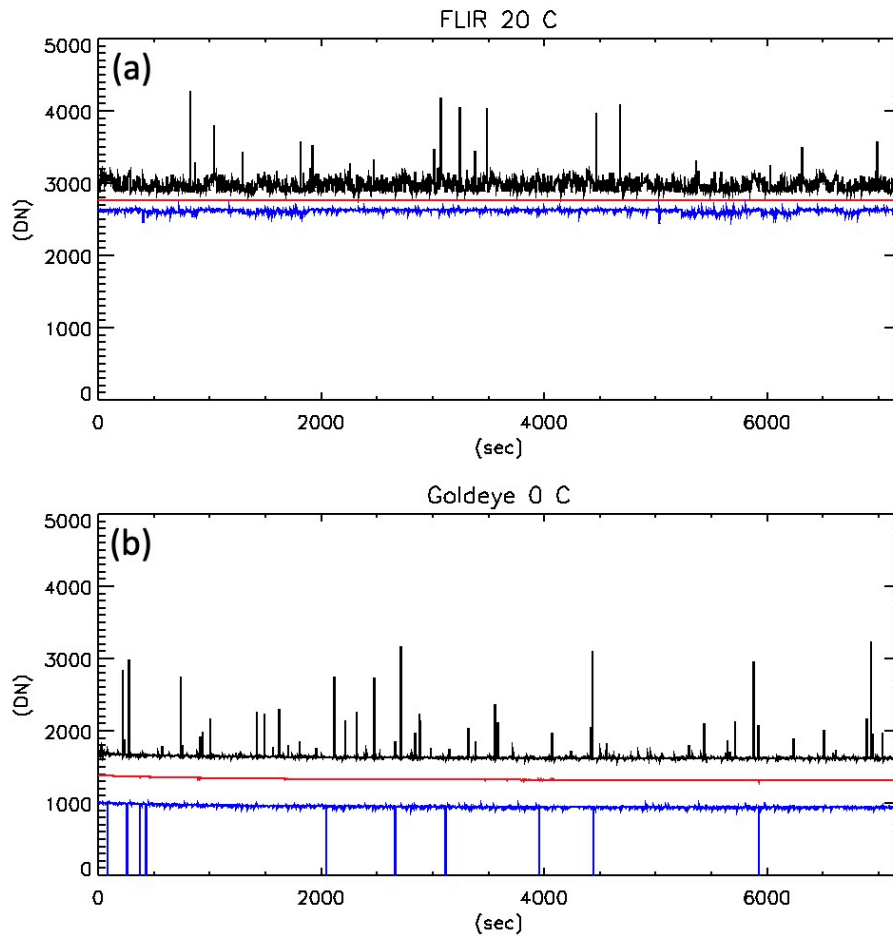


図 4: 露光時間 15 msec、200 枚連続撮像、インターバル 1 sec での 2 時間のダーク連続撮像時の振る舞い。(a) FLIR-A6261 (b) Goldeye G033 SWIR による取得データ、黒、赤、青線はそれぞれ各画像中の最大値、平均値、最小値

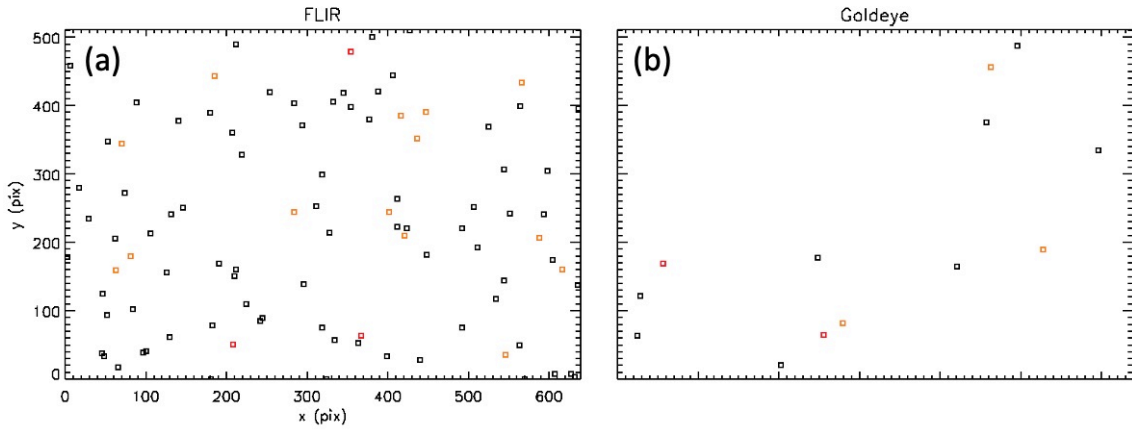


図 5: 2 時間の連続撮像時に視野内で最大値をとるピクセルの座標 (a) FLIR-A6261、(b) Goldeye G033 SWIR 赤プロットは 100 回以上、橙プロットは 10 回以上 100 回未満、黒プロットは 1 回以上 10 回未満

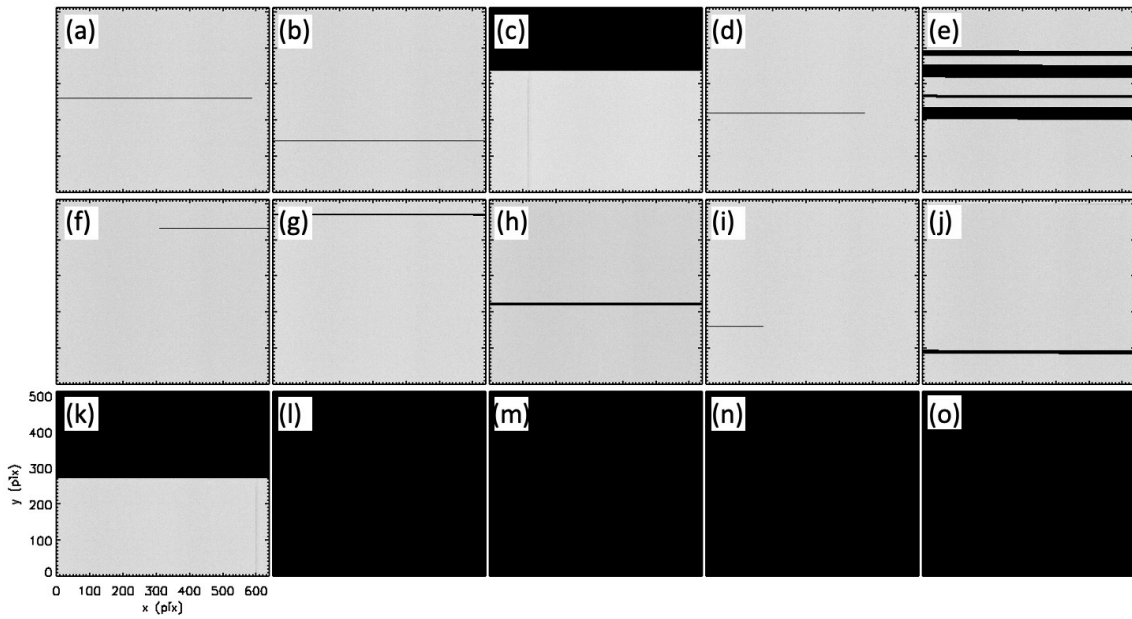


図 6: (a-o) Goldeye G033 SWIR データ欠損発生時のダーク画像

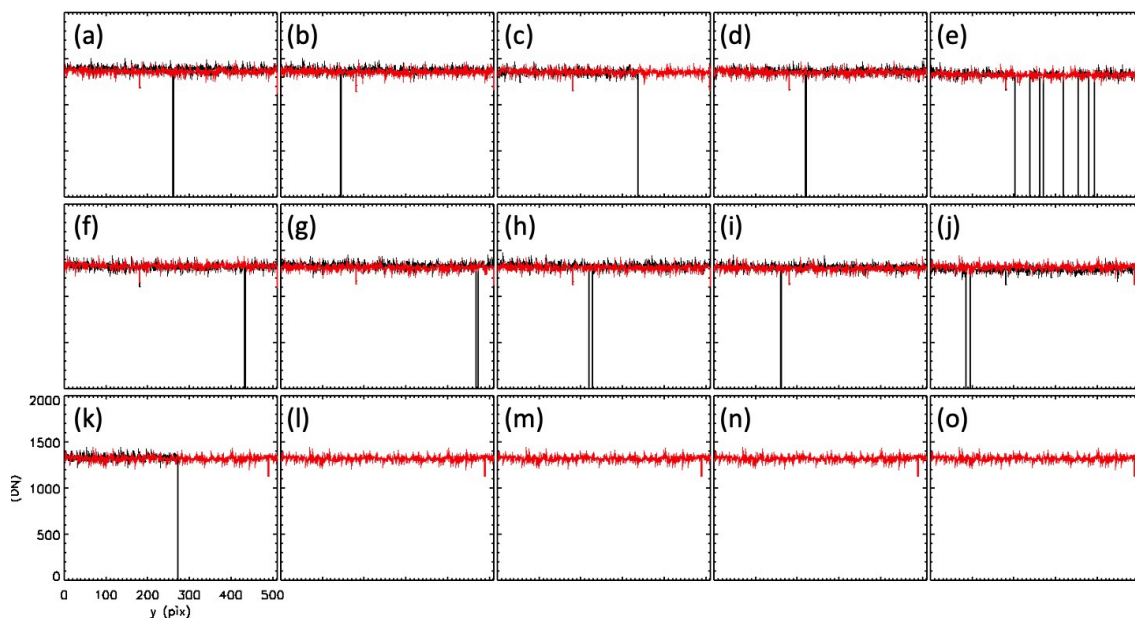


図 7: (a-o) Goldeye G033 SWIR データ欠損発生時の各ダーク画像の $x = 320$ での一次元プロット、黒、赤実線はそれぞれデータ欠損発生時、正常時

4 フレーム抜けと位相ズレ

赤外カメラが高速連続撮像する場合の「フレーム抜け」と「位相ズレ」の有無を調べるため、図 8 のように偏光変調器を用い、直線偏光を変調して光強度の時間変化を解析した。

1. 直線偏光板に人工光源の光を通し直線偏光を作る
2. 回転波長板と直線偏光板の組み合わせで光変調を行う
3. 赤外カメラが回転波長板の原点センサーから外部トリガーをもらい、グレーティングで回折された赤外線光を連続的に撮像する

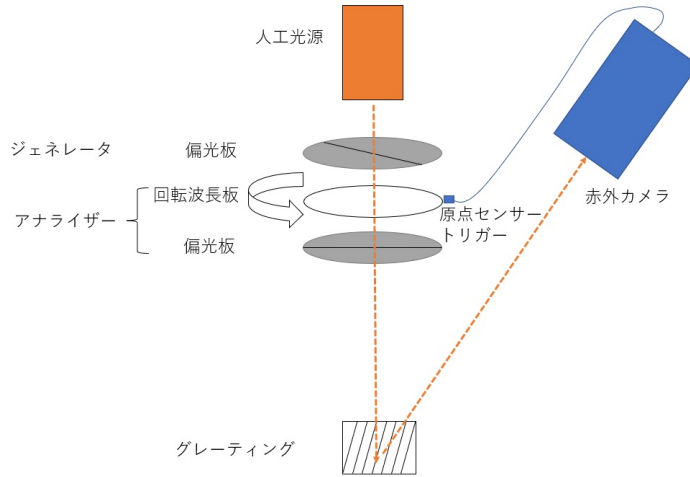


図 8: フレーム抜け実験セットアップ

変調された光強度は正弦波で表される。

$$I_i^{\text{obs}} \propto \sin(4\theta_i + \phi) = \sin\left(4\frac{2\pi}{T} \frac{i}{f} + \phi\right)$$

但し、 θ_i は i 番目のフレームの露出開始時の原点からの角度、 T は波長板の回転周期、 f はカメラの連続撮像のフレームレート、 ϕ は連続撮像開始時の初期位相である。今回の実験では、波長板の回転周期を 1 sec、カメラのフレームレートを 66.67 Hz と設定し、100 フレームを連続撮像する 100 セットのデータを取得した。カメラが取得したスペクトル画像を 50×50 pix のサブ領域で平均し、100 セット \times 100 フレームの光強度変化を二次元画像で示した (図 9)。

100 セットの光強度カーブを正弦波でフィッティングして求めた初期位相 ϕ (deg に単位変換した後の値) とフレームレートを 66.67 Hz として求めた波長板回転周期 T のヒストグラムを図 10 に示した。回転周期のヒストグラムから、いずれのカメラも周期のばらつきは ± 1 msec 以下であり、フレーム抜けがないことが確認された。回転周期平均値の両カメラによる違いはカメラの実際のフレームレートの違いから生じたものだと考えられる。初期位相のヒストグラムと図 9 から、FLIR カメラの 1 セット目に 1 フレーム分の位相ずれがあることがわかった。また、初期位相平均値の 25 度程度 (時間にして ~ 69 msec) の違いは、両カメラのトリガーに対する応答時間のちがいによる。ちなみに、Goldeye G033 SWIR カメラの外部トリガーエッジ検出機能に対し、FLIR カメラでは状態検出機能を用いてソフト的なエッジ検出を行っている。

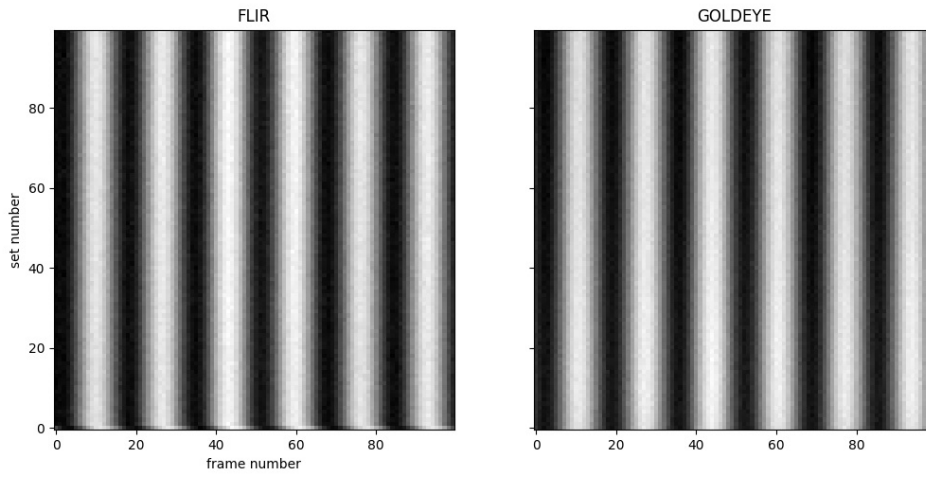


図 9: 強度変調しながら取得した各画像の平均強度。左: FLIR、右: GOLDEYE。縦軸: 繰り返して取得した 100 セットのデータ、横軸: セットごとに連続的に取得した 100 フレーム (波長板 1.5 回転相当)

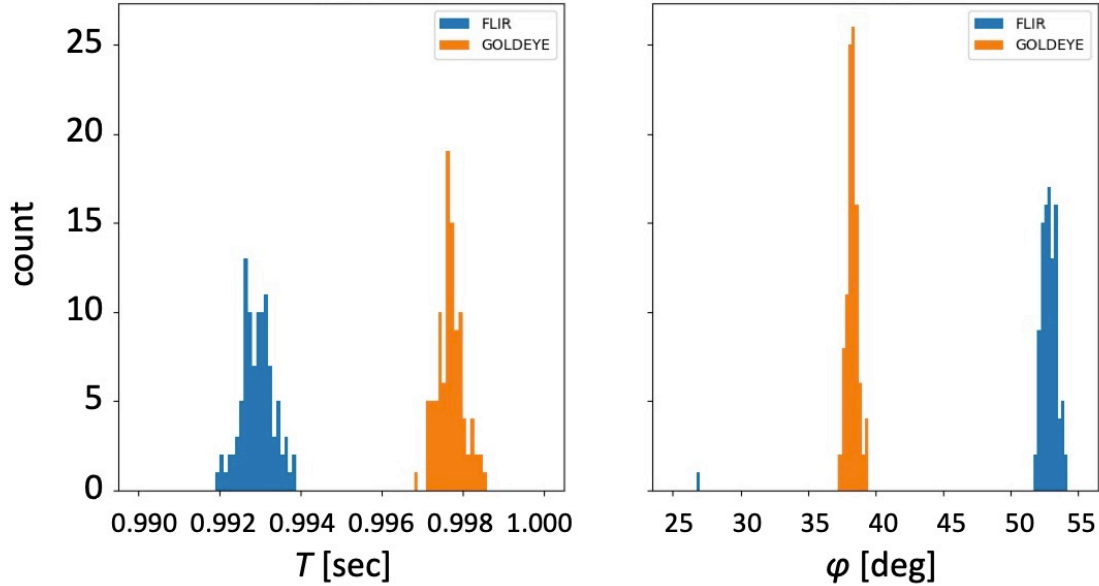


図 10: 光度曲線のフィッティングから求めた波長板回転周期 (左) と初期位相 (右) のヒストグラム。
縦軸: カウント数、横軸: 波長板回転周期 (左) と初期位相 (右) のフィッティング値

5 干渉縞

各カメラにおける干渉縞の大きさを評価するため、FLIR-A6261、Goldeye G033 SWIR、XEVA-640 それぞれについて以下の実験を行った。太陽光を垂直分光器に導入し、スリット幅 0.1 mm、露光時間 15 ms で He I 10830 Å (2 次スペクトル) を 200 枚連続撮像し、その 200 枚の平均をとった。その画像から、同じく 15 ms で撮像したダーク画像を引くことでダーク処理を行った。

干渉縞を強調するために、 5×5 のメディアンフィルタをダーク処理後の画像に実施し、ダーク処理後の画像からメディアンフィルタ実施後の画像を引いた。このようにして得られた画像を図 11 に示した。縦軸が波長方向、横軸はスリット方向であり、それぞれのカメラで干渉縞が現れているのがわかる。FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR に共通して横方向の干渉縞が現れているのはカメラ以外の光学系により生じたものだと考えられる。この干渉縞の振幅は連続光に対して 1% 程度であった。カメラ固有の干渉縞としては、振幅 2% 程度の同心円状の干渉縞が FLIR-A6261 に、振幅 10% 程度の横方向の干渉縞が XEVA-640 にそれぞれ現れていた。Goldeye G033 SWIR には、カメラ固有の干渉縞は見られなかった。

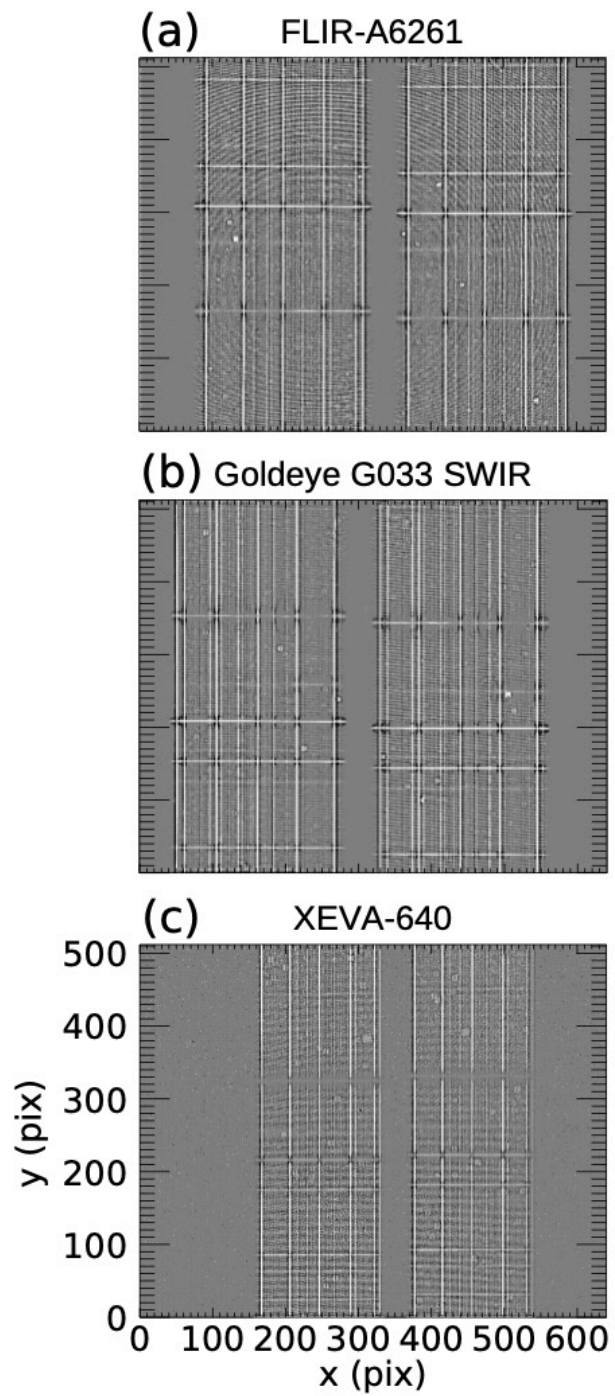


図 11: メディアンフィルタを引いた後の画像。(a)FLIR-A6261、(b)Goldeye G033 SWIR、(c)XEVA-640 である。表示のコントラストはそれぞれ、連続光に対して (a)3%、(b)3%、(c)15%である。

6 測光精度評価: コンバージョンファクター、SN 比

あるピクセルに蓄積された電子数を N_e とする。この時、検出器上で記録されるデジタルナンバー (DN) は、コンバージョンファクター c を用いて、 $DN = N_e/c$ である。一定の光をあてて多数回計測したときの DN の平均および分散は、それぞれ $\overline{DN} = \overline{N_e}/c$ 、 $\sigma_{DN}^2 = \overline{(DN - \overline{DN})^2} = \overline{(N_e - \overline{N_e})^2} c^{-2}$ とかける。フォトンノイズはポアソン分布に従うので、光量が十分に大きい時、DN の平均、DN の分散、電子数 N_e は、以下の関係になる。

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

したがって、コンバージョンファクター c は、DN の平均に対する DN の分散の傾きの逆数で得られる。

$$c = \frac{\overline{DN}}{\sigma_{DN}^2}, \quad (3)$$

また、光量がゼロ極限での DN の分散はダークノイズに対応する。図 12 に、DN の平均に対する分散と、コンバージョンファクターおよびダークノイズの関係についてまとめた。図 12 中に示した、青実線と赤実線は異なる 2 つの露光時間 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$) についてのプロットである。コンバージョンファクターは露光時間によらず一定であるのに対して、 y 切片に対応するダークノイズは露光時間が長いほど大きくなる。この図に示した曲線を、フォトン-トランスファー曲線と呼ぶ (Janesick et al. 1987)。本実験の手法については、EMVA Standard 1288 Release 4.0 General の第 6 章も参照されたい。

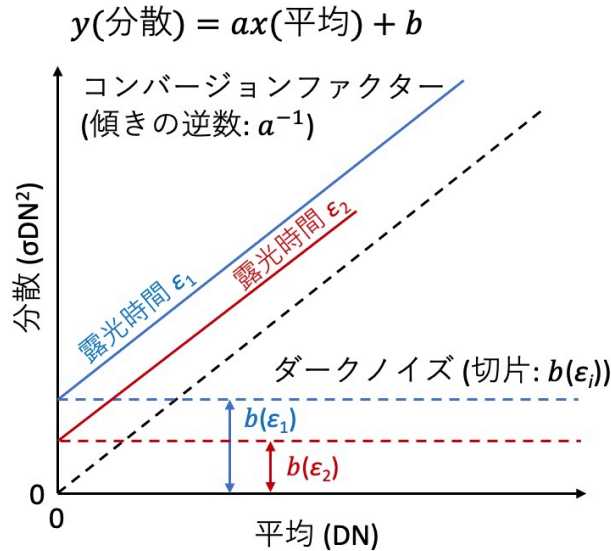


図 12: DN の平均に対する分散と、コンバージョンファクターおよびダークノイズの関係

6.1 実験および解析手法

DST 垂直分光器の焦点面に人工光源 (メタルハライドランプ、SIGMA KOKI IMH-250) を設置し、スリット位置には幅 1 cm のスロットを設置した。分光器は、 10830 \AA の 2 次光が概ね検出器の視野中心にくる様に調整した。カメラの露光時間、15, 50, 100, 200 msec の 4 通りについて、それぞれ 100 枚連続撮像を 1 セットずつ取得した。上記のデータを取得した後、受光面を遮蔽し、ダーク画像を露光時間 15, 50, 100, 200 msec で連続 100 枚ずつ取得した。取得した 100 枚のダーク画像を平均して、1 枚のダークを作成し、人工光を導入して取得した画像全てについてダーク処理を行った。取得データの例を図 13 に示した。

ダーク処理を施した、100 枚の画像のセットそれぞれについて、ピクセル毎に 100 枚の平均と分散を計算した。分散を平均の明るさの関数として、露光時間毎に平均の明るさの DN 値が 9000 以下の部分で線形フィッティングを行い、得られた傾きの逆数を本実験でのコンバージョンファクター、得られた切片の平方根をダークノイズとした。以上の実験および解析を FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR についてそれぞれ行った。

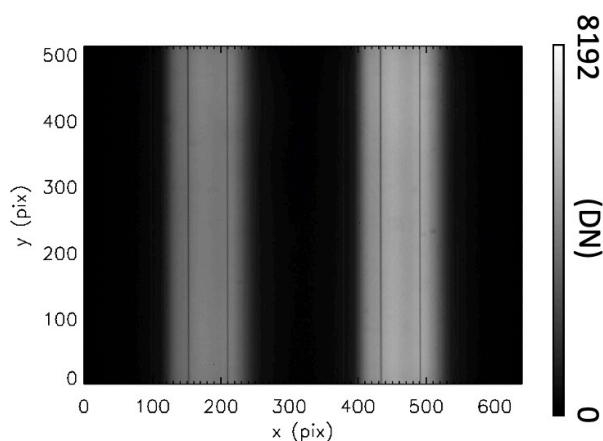


図 13: FLIR-A6261 の取得データ、100 枚連続撮像中の 1 枚目を表示 (露光時間 100 msec)

6.2 コンバージョンファクターおよび SN 比の比較

図 14 の (a,b) それぞれに、FLIR-A6261 および Goldeye G033 SWIR について、100 枚連続撮像の各ピクセルの分散を平均の明るさに対して表示した。黒、赤、緑、橙は露光時間の 15, 50, 100, 200 msec にそれぞれ対応する。また図 14 の (a,b) に青線で示したのは、FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR それぞれの 100 msec でのフォトン-トランスファー曲線のフィッティング結果である。露光時間ごとのフィッティング結果から得られたコンバージョンファクター及びダークノイズは表 3 にまとめた。ただし、表 3 中に示した電子数で表したダークノイズは、露光時間毎に得られたコンバージョンファクターを用いて導出した。本実験で得られたダークノイズの値は、2 章で求めた読み出しノイズの結果と整合した結果である。FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR はいずれも露光時間によって

相異なるダークノイズが得られた。これは、露光時間毎のダークノイズレベルの差に起因すると考えられる(図2(c,d)の赤実線を参照)。また、いずれのカメラについても、露光時間が15 msecの場合は平均の明るさが比較的暗いデータしかないこと、200 msecの場合は比較的明るい部分で線形性を失うことから、50及び100 msecで得られたコンバージョンファクターの平均値をそれぞれのカメラのコンバージョンファクターとした。FLIR-A6261では $4.38 e^-/DN$ 、Goldeye G033 SWIRでは $3.40 e^-/DN$ とそれぞれ得られた。尚、表3から各露出時間で求めたFLIRのコンバージョンファクターが、露出時間に応じて系統的に変化していることがわかる。この理由はよく理解されていない。FLIR-A6261では、ダーク差引後6000 DN程度を超えると出力値が不安定になり、8000 DN程度で線形性を失うのに対して、Goldeye G033 SWIRでは、13000 DN程度まで線形区間をもつことが分かる。

図14の(c,d)にはFLIR-A6261およびGoldeye G033 SWIR、それぞれについて蓄積した電子数に対するSN比を示した。図14(c,d)中のデータ点の色は、図14(a,b)のそれらと対応している。FLIR-A6261では、 $3.5 \times 10^4 e^-$ で電子が飽和するのに対して、Goldeye G033 SWIRでは、 $4.4 \times 10^4 e^-$ 以上の電子を蓄積できる。これらはどちらも仕様書(表1)に記載の値よりもファクター2程小さな数値となっている。

図15(a)にはlog-logスケールで表示した平均強度に対するN/S比の比較を、図15(b)にはlin-linスケールで表示した平均強度に対するS/N比の比較をそれぞれ示した。ただし図15中の平均強度は、FLIR-A6261及びGoldeye G033 SWIRについてそれぞれの露光時間50 msecでの最大強度で規格化した相対強度を示した。すなわち、この図は同じ強度値に対するFLIRとGoldeyeのS/N比の比較となる。また、このS/N比の比較では、2台のカメラのノイズについてバイアス変動を補正した。FLIR-A6261とGoldeye G033 SWIRの15 msecの結果を比較すると露出が短い時はFLIR-A6261の方がGoldeye G033 SWIRよりも高いS/N比を達成することが分かる。また、FLIR-A6261とGoldeye G033 SWIRの200 msecの結果を比較すると露出が長い時はGoldeye G033 SWIRの方がFLIR-A6261よりも高いS/N比を達成することが分かる。特に、FLIR-A6261では相対強度1.5を超えると、出力値が不安定になる影響からSNの改善が見られなくなり、相対強度が3を超えるとSNは明るいほど悪くなる。図15(b)より、最大のS/N比についてはFLIR-A6261が140程度に対して、Goldeye G033 SWIRでは190程度と得られた。Goldeye G033 SWIRの方がより多くの電子を蓄積でき、露光時間が100 msecより長い時はGoldeyeの方がより高いS/N比を達成することが分かった。

さらに、2台のカメラはいずれも相対強度が4のあたりで飽和する(図15(a,b))。他方、FLIRとGoldeyeの飽和電子量はそれぞれ 3.5×10^4 、 $4.4 \times 10^4 e^-$ と得られた(図14(c,d))。すなわち、10830 Å付近では、同じ強度の光の入射に対して蓄積される電子数がGoldeyeの方がFLIRよりも26%程度多く、カタログ値から予想される2台のカメラの量子効率の比率と同程度の値である。

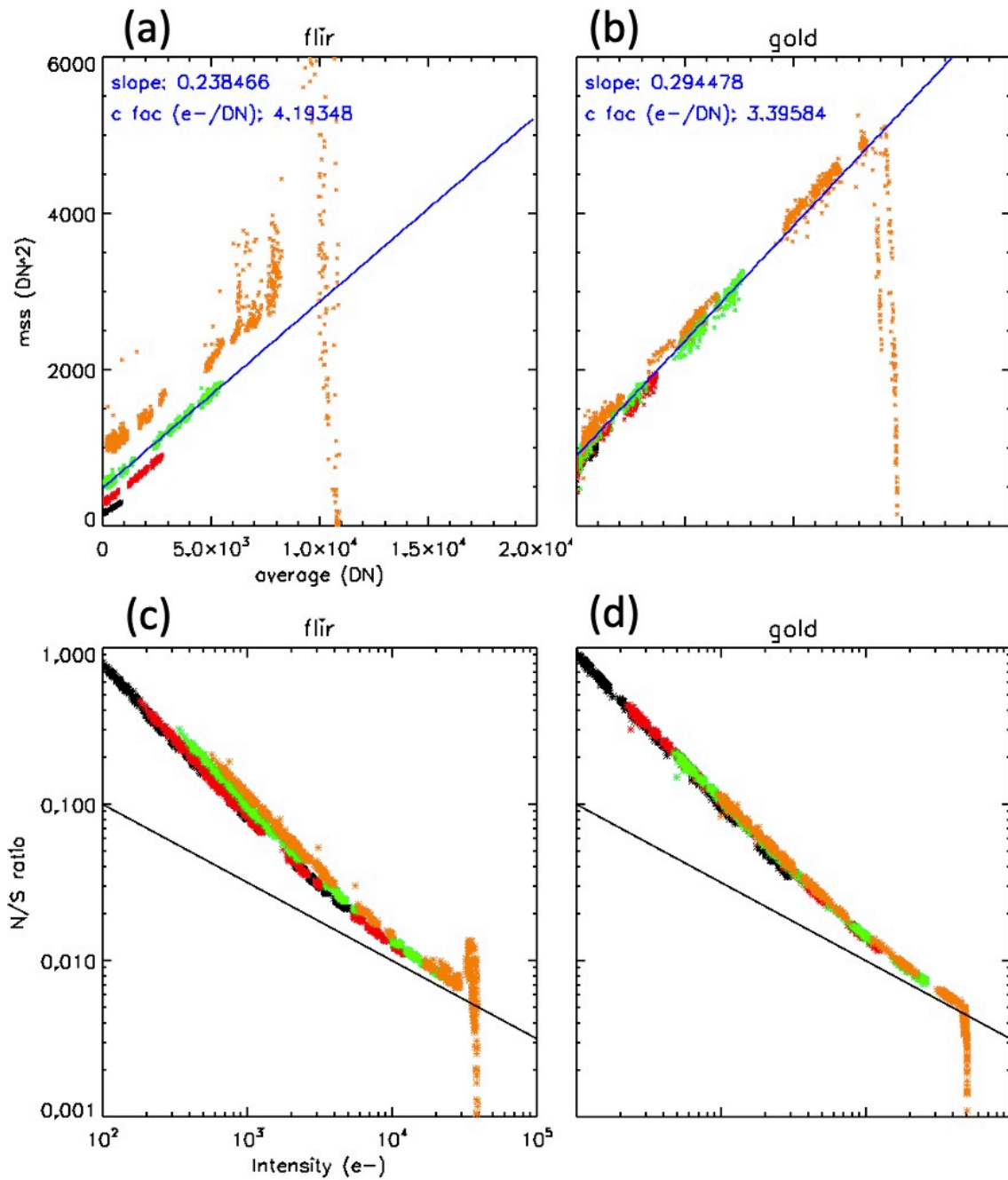


図 14: (a)FLIR-A6261 の平均強度に対する分散、(b)Goldeye G033 SWIR の平均強度に対する分散、(c)FLIR-A6261 の平均強度に対する SN 比、(d)Goldeye G033 SWIR の平均強度に対する SN 比、斜め直線は $\text{N/S} = (e^-)^{-1/2}$ 、(a-d) いずれについても、黒、赤、緑、橙はそれぞれ、露光時間 15, 50, 100, 200 msec のデータ点に対応。

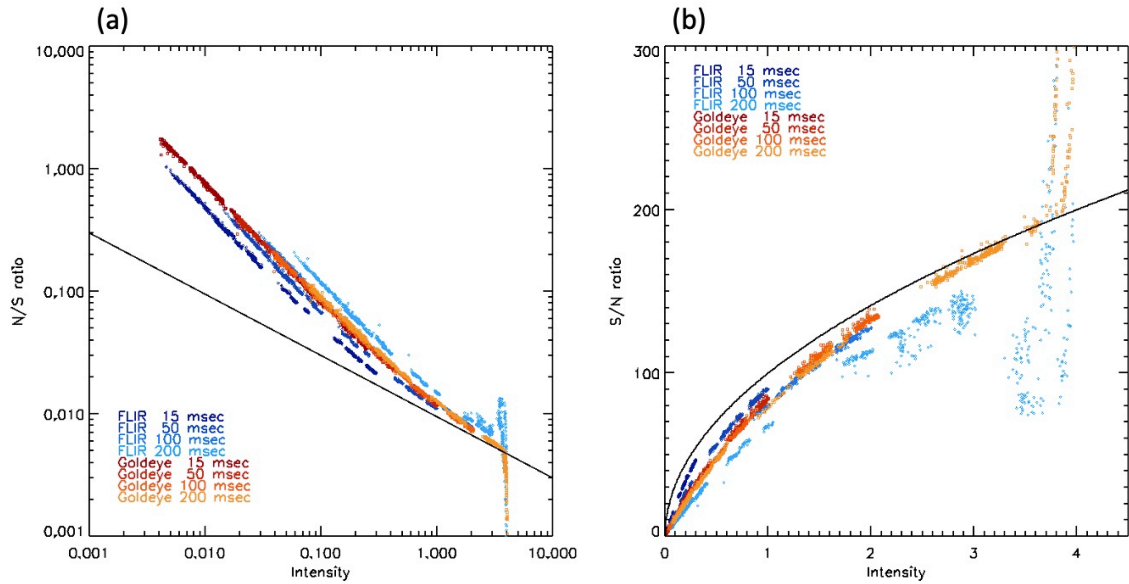


図 15: (a) log-log スケールで表示した強度に対する N/S 比、黒直線は Goldeye の $N/S = (e^-)^{-1/2}$ 、(b) lin-lin スケールで表示した強度に対する S/N 比、黒曲線は Goldeye の $S/N = (e^-)^{1/2}$ 、いずれも強度は露光時間 50 msec での最大強度で規格化し、青系統 4 色組及び赤系統 4 色組のプロットはそれぞれ FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR の 15、50、100、200 msec のデータに対応。

表 3: 測光精度比較

	露光時間 (msec)	15	50	100	200	参考 ¹
ダークノイズ (e ⁻)	Goldeye G033 SWIR	90.5	99.3	102	109	-
	FLIR-A6261	76.3	78.1	93.0	107	-
	XEVA-640 (Oi et al. 2015)	-	-	-	-	994
コンバージョンファクター (e ⁻ /DN)	Goldeye G033 SWIR	3.21	3.40	3.40	3.38	-
	FLIR-A6261	5.96	4.57	4.19	3.55	-
	XEVA-640 (Oi et al. 2015)	-	-	-	-	289

¹ 露光時間 8, 16, 40, 80, 160, 400, 800, 1600, 4000, 8000 msec のデータをまとめてフィッティングした結果

7 線形性

露光時間と視野内の平均の明るさの線形関係を調査するため、以下の実験を行なった。DST 垂直分光器の焦点面に人工光源を設置し、スリット位置にはスロットを設置した。FLIR-A6261 は露光時間を、1, 2, 4, 8, 16, 40, 100, 200, 500, 1000 msec の 9 通りに、Goldeye G033 SWIR は露光時間を 4, 8, 16, 40, 100, 200, 500, 1000 msec の 7 通りに設定し、それぞれ 5 枚連続で撮像を行なった。ダーク

処理を施した、5枚の画像の光がほぼ一様に当たっている部分の平均の明るさを求めた。図16(a,b)に、FLIR-A6261及びGoldeye G033 SWIRそれぞれの露光時間100 msecで取得した画像例を示した。赤四角は、解析に用いた領域を示している。図17に、露光時間に対する検出電子数の結果を示した。黒はFLIR-A6261、赤はGoldeye G033 SWIRで得られた結果である。また、青線は露光時間と平均の明るさの線形関係を仮定した傾きを表している。Goldeye G033 SWIRは、いずれの露光時間の設定に対しても3.32 msecのデッドタイムが生じる(付録Bを参照)。そのため図17では、Goldeye G033 SWIRの結果については、デッドタイムを補正した正味の露光時間を横軸の値とした。FLIR-A6261とGoldeye G033 SWIRはいずれも、露光時間200 msec以下では、露光時間と平均の明るさについて線形関係を示すことが分かった。ただし、露光時間500 msec以上の時、FLIR-A6261ではダーク中に飽和ピクセルが出現するため著しく理論線から外れている。また、露光時間500 msec以上の時、Goldeye G033 SWIRについても人工光を導入した画像でも飽和ピクセルが出現するため理論線から外れる。結論として、両カメラとも飽和に達するまでは、露出時間とDN値による線形性があると言える。

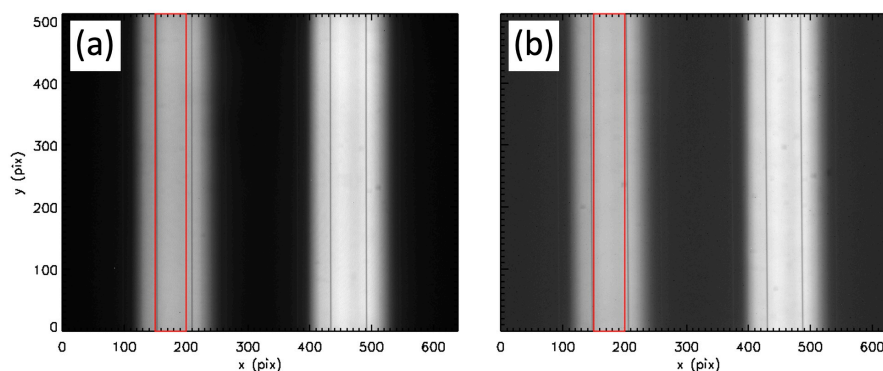


図16: (a) FLIR-A6261 (b) Goldeye G033 SWIR、赤四角は解析に用いた領域

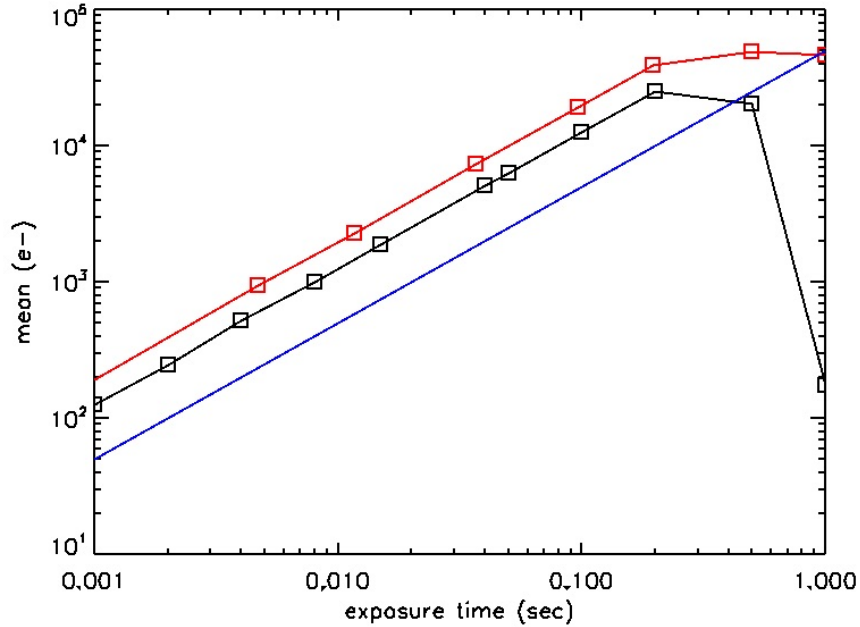


図 17: 露光時間に対する平均の明るさ、黒: FLIR-A6261、赤: Goldeye G033 SWIR、青: 理論線

8 まとめ

我々は DST 偏光分光観測装置で使用する赤外線カメラについて、飛騨天文台が保有する FLIR 社製の赤外線カメラ FLIR-A6261、Allied vision Technologies 社製の Goldeye G033 SWIR 間の性能比較試験を行った。一連の FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR の結果を以下の表にまとめた。FLIR-A6261 では、読み出しノイズおよび熱雑音は、それぞれ 9.7 DN および $128.3 \text{ DN} \cdot \text{s}^{-1/2}$ と得られた。また、Goldeye G033 SWIR では、読み出しノイズおよび熱雑音は、それぞれ 27.9 DN および $23.9 \text{ DN} \cdot \text{s}^{-1/2}$ と得られた。人工光を導入しての実験から、コンバージョンファクターは FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR でそれぞれ 4.38、3.40 (e^-/DN) と得られた。また、露出時間が 100 msec より長い時は Goldeye の方が若干高い S/N が得られ、露光時間 15 msec の時、電子数で比較したダークノイズについては FLIR-A6261 と Goldeye G033 SWIR でそれぞれ 76.3、90.5 (e^-) と得られた。Goldeye G033 SWIR の方が FLIR-A6261 と比較して線形性区間が広く、FLIR-A6261 ではトリガー信号に対して露光開始に遅れが発生しうることから、偏光変調の位相と振幅を適切に取得する必要のある偏光観測には、Goldeye G033 SWIR の方が適していると結論付けた。他方、FLIR-A6261 はフィルター観測による撮像等に用いることとした。

表 4: 実験結果まとめ

品名	FLIR-A6261	Goldeye G033 SWIR
読み出しノイズ (DN)	9.7	27.9 ¹
熱雑音係数 (DN/s ^{1/2})	128.3	23.9 ¹
バッドピクセル時間変化	あり ²	あり ²
フレーム抜け	なし ³	なし
位相ズレ	あり ⁴	なし
データ欠損	なし	あり ⁵
干渉縞	2%	なし
コンバージョンファクター (e ⁻ /DN)	4.38	3.40
ダークノイズ (e ⁻) ⁶	76.3	90.5
線形性区間 (DN)	[0:8000]	[0:13000]
線形性区間 (e ⁻)	[0:35000]	[0:44000]
最大の S/N	140	190
外部トリガ検出	状態検出、エッジ検出 (ソフト)	状態検出、エッジ検出

¹ センサー温度 0 °C の場合

² 連続撮像時に視野内で最大値が 1000 DN 程度変動

³ ジャンボパケット最大でなし

⁴ 最初のデータセットでズレあり

⁵ ジャンボパケット最大でも発生することがある

⁶ 露光時間 15 msec の場合

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] Anan, T., Huang, Y., Nakatani, Y., Ichimoto, K., Ueno, S., Kimura, G., Ninomiya, S., Okada, S., & Kaneda, N., 2018, PASJ, 70, 102
- [4] Nakai, Y. & Hattori, A. 1985, Memoirs of Faculty of Science, Kyoto University, Series of Physics, Astrophysics, Geophysics and Chemistry, 36, 385
- [5] 大井瑛仁、阿南徹、佐野聖典、一本潔、永田伸一、2015、京都大学理学研究科附属天文台技報、Vol.3-1
- [6] Janesick, J. R., Klassen, K. P., & Elliot, T., 1987, Optical Engineering, 26, 972-980

A FLIR-A6261 の Non Uniformity Correction (NUC)

FLIR-A6261 には、画素毎の感度のばらつきを較正する Non Uniformity Correction (NUC) 機能がある。検出器に入力される光の強度に対して、出力される DN 値の関係を視野内で均一にするため、画素毎に異なる補正係数を与える。FLIR-A6261 の NUC では、工場で一様な黒体の撮像から計測されたゲインとカメラシャッターを用いて取得されるオフセットを用いて線形補正を行う。オフセットは、観測の都度行うことで補正係数を更新できる。光の強度 (intensity) と輝度値 (DN) 及び、ゲイン (a_i) とオフセット (b_i) は以下の関係になる。

$$\text{DN}(p_i) = a_i \times \text{intensity} + b_i, \quad (4)$$

ただし、 $\text{DN}(p_i)$ は i 番目の画素から出力される輝度値を表し、 a_i 及び b_i は i 番目の画素の補正係数である。図 18 に NUC の概念図を示した。

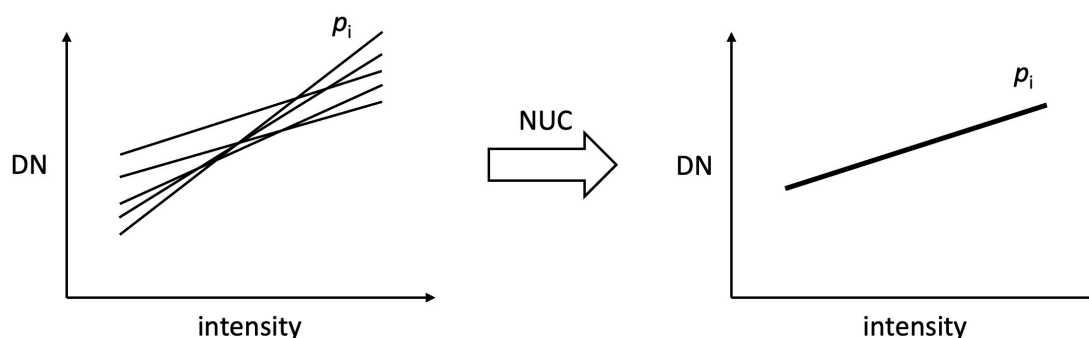


図 18: NUC の概念図

また、実際に NUC 前後で取得される画像を図 19、20 に示した。図 19 に示したのは、NUC 前後で受光面を遮蔽してダークを取得した画像例である。図 19(c) 及び (f) に示した通り、露光時間 15 msec 及び 100 msec いずれの場合においても、NUC 前 (黒) と比べて NUC 後 (赤) の方が、画素毎のばらつきが小さくなっている。また、図 20 に示したのは、人工光を導入した場合の NUC 前後での画像例である。図 20(c) 及び (f) に示した通り、露光時間 15 msec 及び 100 msec いずれの場合においても、NUC 前 (黒) と比べて NUC 後 (赤) の方が、画素毎のばらつきが小さくなっている。

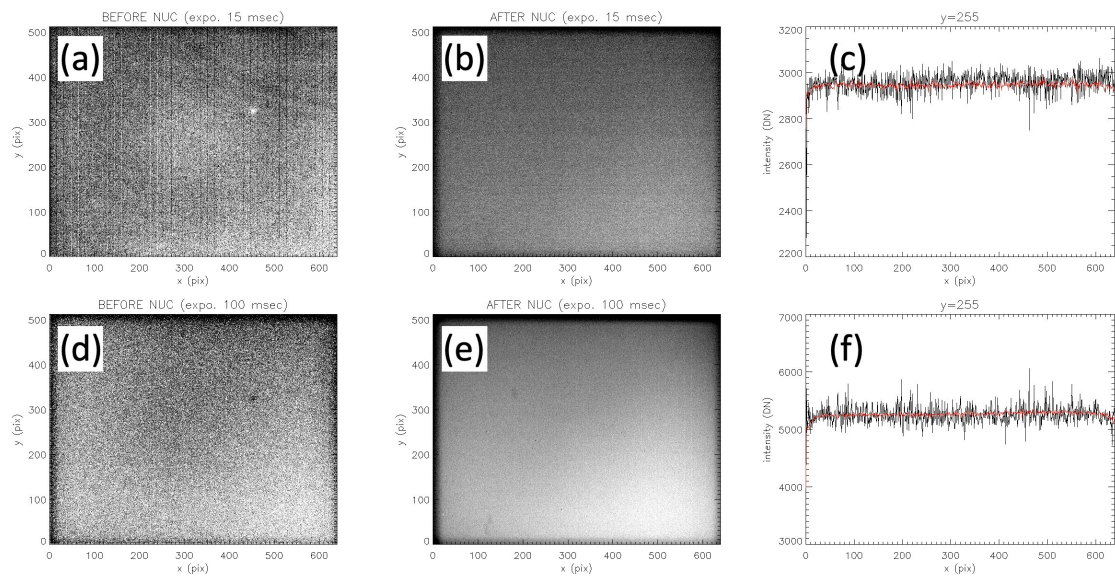


図 19: 受光面を遮蔽して取得した NUC 前後の画像、(a) 露光時間 15 msec で NUC 前、(b) 露光時間 15 msec で NUC 後、(c) 露光時間 15 msec の $y = 255$ での NUC 前後の DN 値の 1 次元プロット、黒が NUC 前で赤が NUC 後、(d) 露光時間 100 msec で NUC 前、(e) 露光時間 100 msec で NUC 後、(f) 露光時間 100 msec の $y = 255$ での NUC 前後の DN 値の 1 次元プロット、黒が NUC 前で赤が NUC 後

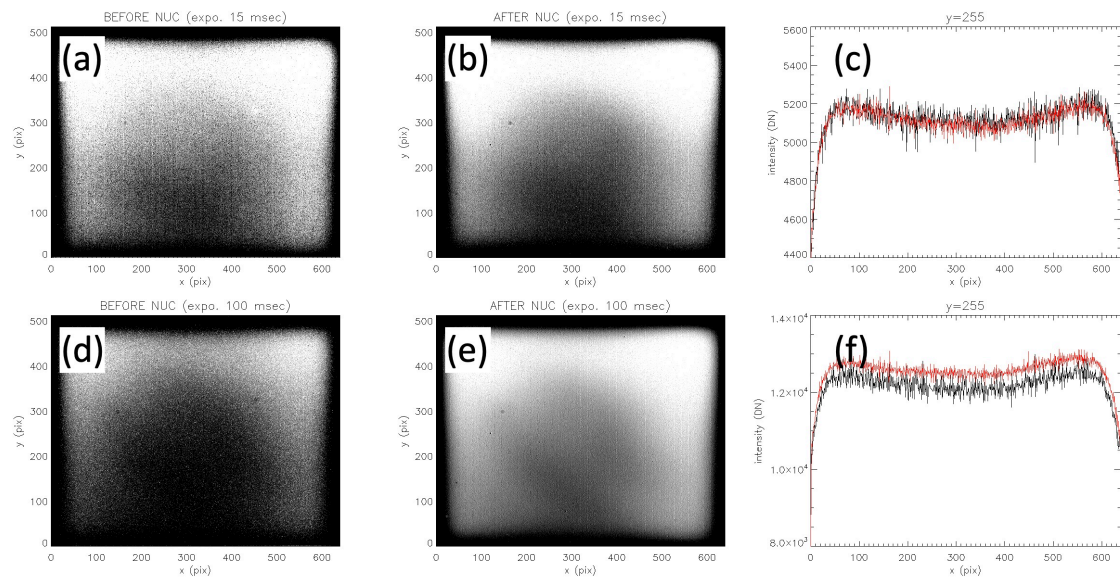


図 20: 人工光を導入して取得した NUC 前後の画像、(a) 露光時間 15 msec で NUC 前、(b) 露光時間 15 msec で NUC 後、(c) 露光時間 15 msec の $y = 255$ での NUC 前後の DN 値の 1 次元プロット、黒が NUC 前で赤が NUC 後、(d) 露光時間 100 msec で NUC 前、(e) 露光時間 100 msec で NUC 後、(f) 露光時間 100 msec の $y = 255$ での NUC 前後の DN 値の 1 次元プロット、黒が NUC 前で赤が NUC 後

B Goldeye G033 SWIR のデッドタイム

Goldeye G033 SWIR では、VimbaSDK に与える露光時間 (ϵ) とフレームレート (f) を比較すると、露出が短いところで $f = 1/\epsilon$ から系統的なズレを含むことが分かった (図 21 参照)。これは、Goldeye は露光から次の露光までの間にデッドタイムがあって、実際のフレームレートは $f = 1/(\epsilon + \Delta t)$ となるためである。実験で得られたフレームレートをこの式でフィッティングした結果、 $\Delta t = 3.32$ msec が得られた。そこで、観測 GUI 上では $\epsilon' = 1/f = \epsilon + \Delta t$ で露光時間を与えることとした。

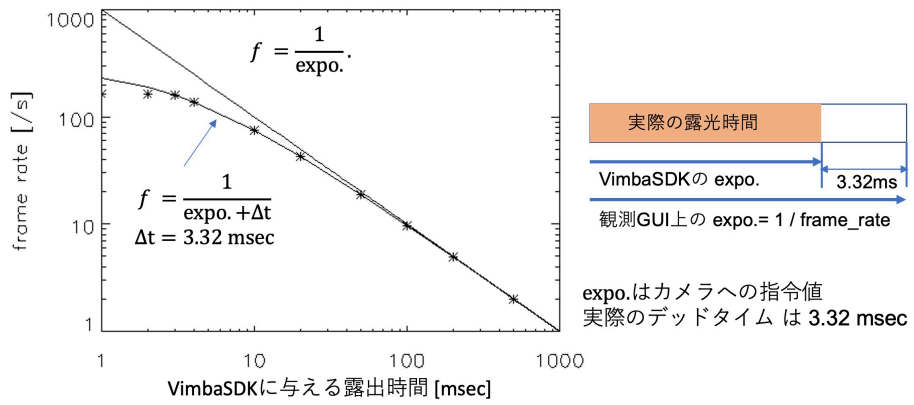


図 21: Goldeye G033 SWIR の観測 GUI 上の露光時間と実際の露光時間の関係