

西はりま天文台近赤外線カメラ NIC の性能評価

石黒正晃^{1,2}、高橋 隼³、 禅野孝広、時政典孝³、黒田武彦^{3,2}

- 1) ソウル大学
- 2) 兵庫県立大学
- 3) 西はりま天文台

Performance Evaluation of the NHAO Near-Infrared Camera

Masateru ISHIGURO^{1,2}, Jun TAKAHASHI³, Takahiro ZENNO, Noritaka TOKIMASA³,
and Takehiko KURODA^{3,2}

1) *Seoul National University, San56-1, Shillim-dong Gwanak-gu, Seoul 151-742, South Korea*

2) *University of Hyogo, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan*

3) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan*

E-mail: ishiguro@astro.snu.ac.kr

(Received 2011 December 10)

概要

我々は、主に 2011 年 7 月から 2012 年 2 月にかけて、西はりま天文台 3 波長同時観測近赤外線カメラ（通称 NIC）の性能評価試験を行った。検出器のコンバージョンファクタは、J: 9.2 ± 0.2 [e^- /ADU], H: 9.8 ± 0.2 [e^- /ADU], Ks: 9.4 ± 0.2 [e^- /ADU] と測定された。読み出しノイズは、J: 50 ± 4 [e^-], H: 75 ± 4 [e^-], Ks: 83 ± 5 [e^-] であった。視野とピクセルスケールは、それぞれ $2.73' \times 2.73'$ と $0.16''$ /pixel で、ほぼ設計値通りの値である。リニアリティの限界は、J, H, Ks いずれの検出器においても概ね 8,000 [ADU] であった。散開星団を用いた観測（120 秒露出 \times 10 点ディザリング）により、S/N=10 となる限界等級は J: 16.6 [mag], H: 16.7 [mag], Ks: 15.9 [mag] と導出された。測光精度は、相対測光値の統計的ばらつきにより、J: 0.014 [mag], H: 0.005 [mag], Ks: 0.011 [mag] が得られた。今後は科学観測に用いながら、さらなる性能向上を目指す。

Abstract

We present the results of the performance test of the NHAO near-infrared camera (tentatively called NIC), which enables JHKs simultaneous imaging. The test was conducted mainly from July 2011 to February 2012. The measured conversion factors of the detectors are J: 9.2 ± 0.2 [e^- /ADU], H: 9.8 ± 0.2 [e^- /ADU], and Ks: 9.4 ± 0.2 [e^- /ADU]. The readout noises of J: 50 ± 4 [e^-], H: 75 ± 4 [e^-], Ks: 83 ± 5 [e^-] are obtained. We derived the field-of-view and pixel scale of $2.73' \times 2.73'$ and $0.16''$ /pixel, respectively, which are well consistent with the designed values. The evaluated linearity limit is $\sim 8,000$ [ADU] for any of the detectors for three bands. Our observation of an open cluster, with 120-sec exposure \times 10-point dithering, provides the limiting

magnitudes of J: 16.6 [mag], H: 16.7 [mag], Ks: 15.9[mag], where we define the limiting magnitudes as those which give the signal-to-noise ratio of 10. We achieved photometry precisions of J: 0.014 [mag], H: 0.005 [mag], Ks: 0.011 [mag], based on the statistical fluctuations of the measured relative magnitudes. The performance of NIC will be upgraded while it is used for scientific researches.

Key words: science instrument – near-infrared – performance – photometry

1. はじめに

西はりま天文台 3 波長同時観測近赤外線カメラ (通称 NIC) は、なゆた望遠鏡カセグレン焦点用に開発された観測装置である。近赤外線 J、H、Ks バンド同時に画像を取得できるよう設計されている。さらに、オプションとして、偏光撮像の機能も有している。NIC の主な仕様は、表 1 の通りである。

我々は、実観測に向けて、NIC の性能評価と性能向上に努めてきた。本稿では、主として 2011 年 7 月から 2012 年 2 月までに実施した性能試験について報告する。

Table 1. NIC の主な仕様.

検出器:	Rockwell HAWAII 検出器 (1024×1024 pixel, HgCdTe) ×3
光学系:	オフナー光学系と 2 枚のダイクロイックミラー
観測波長:	J, H, Ks バンド
視野:	2.7' × 2.7'
オプション:	直線偏光観測モード (視野 23" × 35")

2. 性能試験

2-1. 検出器

(a) コンバージョンファクタ、および読み出しノイズ

検出器内部の回路及び読み出し回路に起因するノイズを読み出しノイズという。一方、後述の通り、スカイバックグラウンドに起因するノイズも発生する。後者は、観測時に避けることのできないノイズである。したがって、NIC 立ち上げの最終目標として、読み出しノイズがスカイバックグラウンドノイズ以下になることを目指してきた。

検出器の読み出しノイズは、原理的には、検出器に電荷が蓄積されていない状態で読み出しを行い、その分散から調べることができる。しかし、検出器に電荷が蓄積されていない状態で読み出すことは容易ではない。したがって、永山 (2004) を参考に、均一な光源を異なる輝度で測定し、測定結果を外挿してゼロシグナルレベルでの分散値から読み出しノイズを導出した。すなわち、ドームフラット画像を異なる輝度で 2 枚ずつ撮像し、その分散を求め、これら読み出しノイズを求めた。この手法では、読み出しノイズだけでなく、コンバージョンファクタ (測定値 1 データカウント (ADU) あたりの電荷数) も決定することができる。

試験初日 (2011 年 7 月 26 日) は、シャッター用モータ電源を入れていたため、Ks バンド検出器はノイズが大きく、読み出しノイズを正しく測定することができなかった (図 1)。7 月 28 日にモータ電源を切った

状態で再度測定を行った。図 1,2 において、傾きがコンバージョンファクタ (C.F.) の逆数、Y 切片は読み出しノイズ (単位は ADU^2) である。表 2 はその測定値をまとめたものである。各検出器の特性はほぼ一定だといえる。

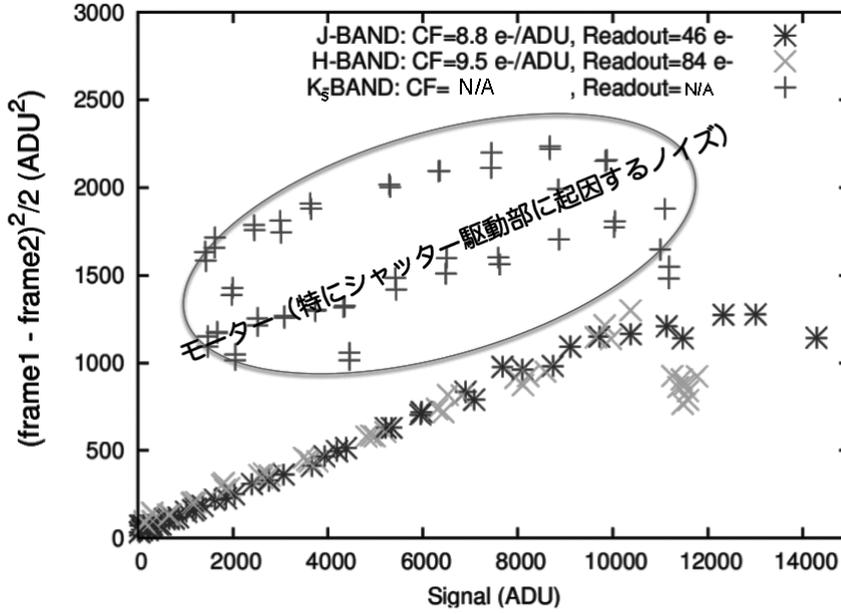


Fig. 1. Measurement of C.F. and readout noise. Electric supply of the shutter motor was on.

Table 2. Measured C.F. and readout noise.

	Motor electricity ON		Motor electricity OFF	
	C.F. [e^-/ADU]	Readout noise [e^-]	C.F. [e^-/ADU]	Readout noise [e^-]
J-band	9.8 ± 0.2	46 ± 5	9.2 ± 0.2	50 ± 4
H-band	9.5 ± 0.2	84 ± 5	9.8 ± 0.2	75 ± 4
Ks-band	N/A	>250	9.4 ± 0.2	83 ± 5

次に、測定した C.F. の妥当性について検討する。NIC のプリアンプの増幅率は 4.29 である。製造元である Rockwell 社による検出器の C.F. の値は、 $3.4\text{--}6.8 \mu\text{V}/e^-$ である。したがって、NIC の C.F. は $5.2\text{--}10.5 (e^-/\text{ADU})$ と予想することができる¹。この予測値は、かなり幅があるものの、我々の測定値と一致していることがわかる。

以上の測定は、データのサンプリング回数が 1 回の場合である。この検出器は、非破壊読み出しが可能なので、サンプリング回数を増やせば、理論的にはその 1/2 乗に比例して、読み出しノイズが低下することが予

¹ 検出器の C.F. を K_1 、プリアンプの増幅率を G 、AD コンバータに入力される信号を K_2 とすると、プリアンプで G 倍に増幅された信号が AD コンバータに入力されるので、 $K_2 = G \cdot K_1 = (1.46 \sim 2.92) \times 10^{-5} [\text{V}/e^-]$ となる。一方、AD コンバータは 0-10 V を 16 bit (=65536) で割り振っているため、1ADU あたりの電圧は、 $K_3 = 10/2^{16} = 1.53 \times 10^{-4} [\text{V}/\text{ADU}]$ 。したがって $C.F. = K_2/K_3 = 5.2 \sim 10.5 [e^-/\text{ADU}]$ 。

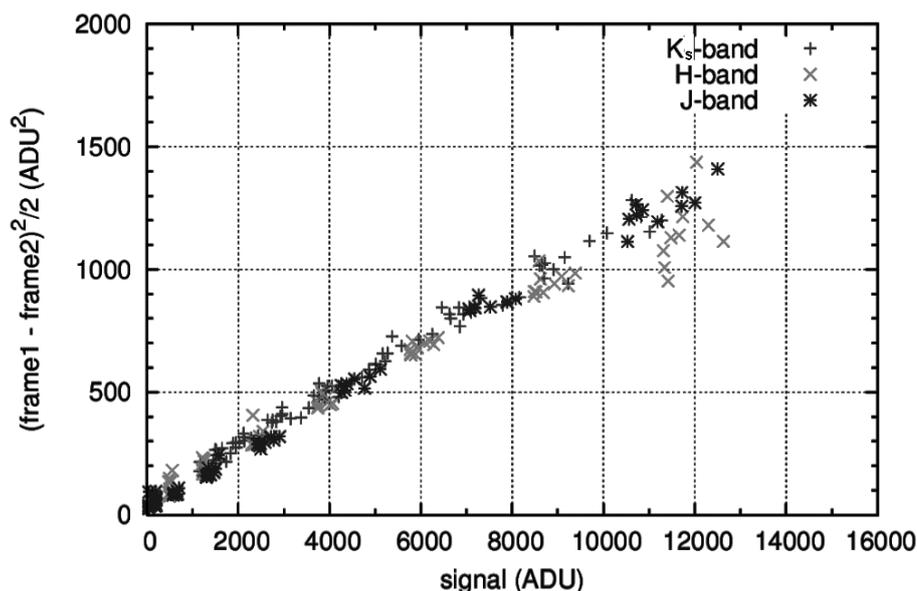


Fig. 2. Measurement of C.F. and readout noise. Electric supply of the shutter motor was off.

想される。追加試験として、読み出し回数を増やして、読み出しノイズの測定を行った。概ね、読み出し回数の1/2乗でノイズが低減されていることを確認した(図3)。

(b) リニアリティ

入力シグナルと、検出器の出力シグナルの直線性をリニアリティという。ある一定量以上の入力シグナルがあると、直線性は保てなくなり、電荷が飽和する。つまり、観測天体の明るさを正確に測定するためには、検出器のリニアリティを正しく理解しなくてはならない。

図4は、さまざまな積分時間(横軸)で撮像したフラット画像の平均値(ADU, 縦軸)である。各バンド共に、出力シグナルが小さい領域では、積分時間(すなわち入力シグナルと正比例する量)と出力シグナルは正比例している様子が、この図から見て取ることができる。約10,000~15,000ADU以下で、これら3つの検出器ともリニアリティが保たれているように見える。

ただし、ここで飽和レベルが光量によって異なることに注意しなければならない。NICの出力シグナルは、2回の読み出しの差(CDS, Correlated Double Sampling)になっており、光量が明るいと、1回目の読み出しまでに無視できない量のカウントが得られていることになる。したがって、飽和レベルは入力光量に依存する。NICの現在の読み出しでは、SIRIUSを参考に、(1)検出器リセット後、(2)空読みを経て(3)1回目のサンプリングを行っている。

さらに詳細にリニアリティを調べるために、異なる積分時間で2枚の画像を撮像し、短時間露光の画像は10,000 ADUを超えないように積分時間を調整してドームフラットを撮像した。図5は、横軸が短時間露光フレームから見積もった入射フラックスで、リセット後から1回目の読み出しまで(1回サンプリング観測モードでは2秒間)に蓄積するカウント数も考慮している。縦軸は、長時間露光フレームで実際に得られたカウント数を入射フラックスで割り算したものである。8,000-10,000ADUを超えたあたりからリニアリティは

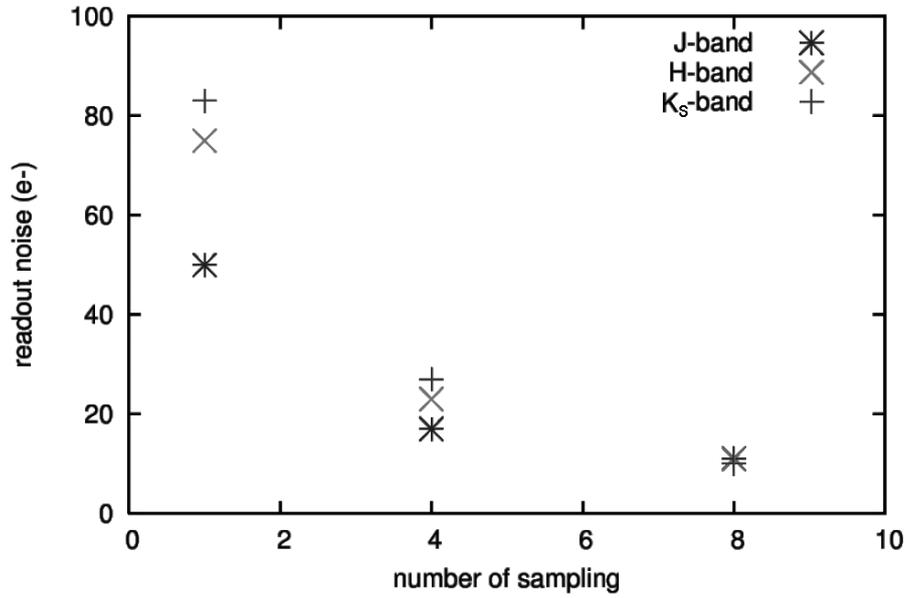


Fig. 3. Correlation between sampling number and readout noise.

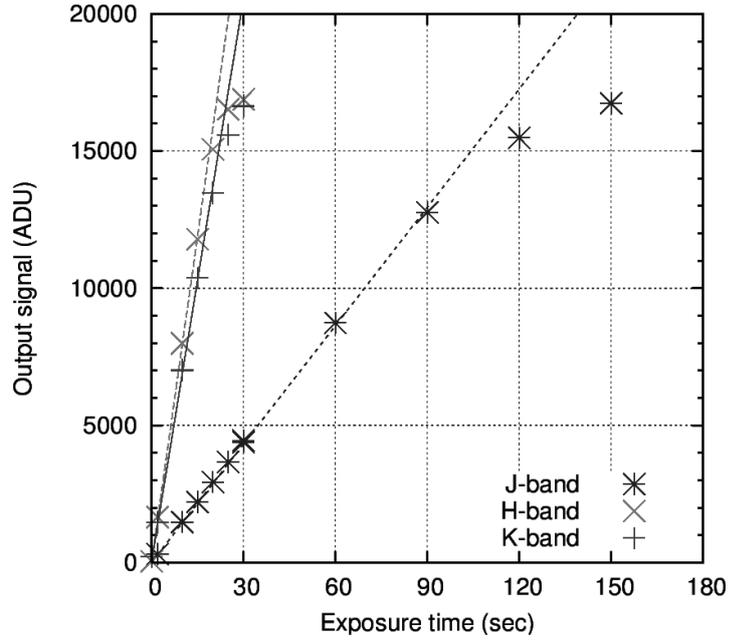


Fig. 4. Linearity measurement. These data were taken with different exposure time (horizontal axis). The vertical axis denotes the average over the frame.

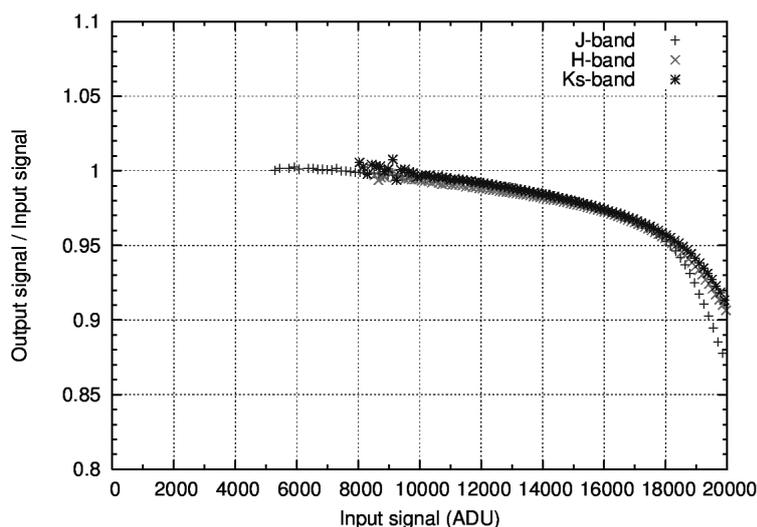


Fig. 5. The relationship between the input signal and the ratio of output signal with respect to the input signal.

悪くなり、18,000ADU 以上で完全に飽和している。以上の結果から、(画像で得られたカウント数) × (露出時間 + 2 秒) / (露出時間) が 8,000 ADU を超えないように露出時間を決定することを推奨する。

(c) ダーク

検出素子は光を入れない状態でも電荷を出し(暗電流) 加算成分を与える。したがって、観測では検出器に光を入れない状態で撮像した画像(ダーク画像)を取得し、解析でこのダークカウントを差し引く必要がある。NIC では観測装置の冷却部にあるシャッターを閉め、ダーク画像を取得する。シャッターを開閉するための直動機構のモーター電源を入れた状態で撮像を行なうと、2-1. (a) で述べた通り、電氣的ノイズが混入し画像が乱れることがわかった。そこで、現時点では、モーター電源はシャッターを開閉するときのみ入れることにし、撮像を行なうときは電源を切っておく必要がある。

図 6 は、連続して撮像した J バンド 5 秒露出のダーク画像である。画像に縦パターンが見えている。このパターンの peak-to-peak カウント差は、10-30 ADU 程度であり、バンド(検出器個体)・露出時間への依存は確認されていない。縦パターンは露出ごとに変わり、再現性がない(図 6)。天体画像にもこのパターンは乗っていると考えられるが、再現性がないためダーク差し引きで除去することはできない。処理の方法については、2-5. で述べる。

図 7 は露出時間とダーク画像平均カウント値の関係を示したものである(試験日 2012 年 2 月 15 日)。ひとつの露出時間あたり、10 枚連続 × 2 セットの撮像を行った。カウント値が平均から大きく離れた画像は除外した上で、画像を重ね合わせ平均化した。平均化された画像の全ピクセルカウントの平均値を IRAF の imstat タスクを用いて求めた。上下 3σ クリッピングを 2 回繰り返して算出した(imstat のパラメータ: nclip=2, lsigma=3, usigma=3)。J バンドのカウントは露出時間とともに増加し、この増加分がダーク(暗電流)成分であると考えられる。 $Counts = a \times exptime + b$ でフィットさせると $a = 6.6 \times 10^{-3}$ [ADU/sec] となり、 $Counts = a \times exptime$ でフィットさせると $a = 9.2 \times 10^{-3}$ [ADU/sec] となる。天体観測時の典型的露出時間の 200 秒までの範囲では、ダーク成分は $< 2ADU(20e^-)$ と考えられ、そのポワソンノイズは $< 5e^-$ と見積も

れる。これは読み出しノイズに比べて無視できるレベルである (表 2)。H, Ks の平均カウントは露出 30 秒までの範囲で露出時間とともに急激に減少し、その後減少がなだらかになり、負の値で収束していくように見える。このような振る舞いは暗電流では説明がつかない。原因は定かではないが、本試験では露出時間に依存した負の「バイアス」と考え、ダーク画像の差し引きによって除去されるものと想定した。

図 8 は、(上記「バイアス」を含めた)ダークカウントの長期的な安定性を見るため、試験全期間(2月15日、22日除く)に取得したダーク画像のカウントを露出時間に対してプロットしたものである。ダーク画像は観測日ごとに、図 7 のデータ処理と同様の方法で重ね合わせしてある。概ね図 7 と同様の振る舞いを見せている。しかし、H, Ks では、露出時間が同じでもカウント値に数 10-100ADU の差がある。したがってダーク画像は少なくとも観測日ごとに取得する必要があることがわかる。

また、10 分から 1 晩程度の短期間の安定性を試験した。図 9 は、2012 年 1 月 25 日に 10 秒露出で撮像した各ダーク画像の平均カウントをプロットしたものである。10 枚連続撮像を 1 セットとし、これを 2 セット繰り返し返した。すなわち、画像番号 1-10 が 1 セット目、11-20 が 2 セット目である。開始から終了までの時間は 10 分弱であった。図 10 は、2011 年 11 月 15 日に取得した 120 秒露出のダーク画像について図 9 と同様にプロットしたものである。画像番号 1-10 が連続撮像 1 セット目、11-20 が 2 セット目、21-40 が 3 セット目である。経過時間は約 2 時間 15 分であった。図 11 は、2012 年 2 月 22 日に 180 秒露出のダーク画像を 100 回連続して撮像したものである。経過時間は約 5 時間 30 分であった。H, Ks では、連続露出の最初あるいは初め 2 枚の画像で、カウントが高い場合がある (図 9: 番号 1, 2, 11; 図 10: 番号 1, 2, 11, 21; 図 11: 番号 1)。これは検出器制御が関係していると考えられる。10 秒ダークの全画像 (H, Ks は画像番号 1,2,11 を除いた) の平均カウントおよび標準偏差は J:1.1±0.9ADU, H:5.4±1.8ADU, Ks:-21.4±1.1ADU であった。120 秒ダークの全画像 (H, Ks は画像番号 1,2,11,21 を除いた) の平均カウントおよび標準偏差は J:1.0±3.7ADU, H:-23.1±2.8ADU, Ks:-36.1±4.1ADU であった。180 秒ダークの全画像 (H, Ks は画像番号 1 を除いた) では、J:1.6±1.5ADU, H:-24.0±2.9ADU, Ks:-37.7±2.4ADU であった。

2-2. 視野の位置ずれ・回転

NIC の特徴は、3 波長同時にデータを取得できることにある。しかしながら、波長間で視野のずれがあると、観測効率が悪くなる。ここでは、検出器ごとの視野のずれを、H バンドに対する相対値として求めた。測定には、2011 年 1 月 31 日に撮像したオリオン KL 領域の画像を用いた。取得データを 2MASS カタログの座標値と比較して、1 ピクセルあたりの天球上での大きさも調べた。

その結果を表 3 に示す。H バンドに対する相対ずれ量は、30 ピクセル (0.5mm) 以下であることがわかる。また、視野回転も 0.5° 以下に収まっている。これらのずれ量は、視野全体の 3%未満である。XY 平面上での微調整は可能であるが、ずれは小さいため、これ以上の調整は必要ないと判断した。

Table 3. pixel scales and offsets of image positions/angles

	$\Delta x ["/\text{pix}]$	$\Delta y ["/\text{pix}]$	offset $x [\text{pix}]$	offset $y [\text{pix}]$	offset $\theta [^\circ]$
J band	0.160	0.160	+29	+26	-0.07
H band	0.160	0.160	(0)	(0)	(0)
Ks band	0.160	0.160	+6	-7	-0.46

2MASS カタログの座標値との比較から、1 画素の大きさは、0.16"、視野は 2.73' であることがわかった。この値は、設計値 (ピクセルスケール 0.16"/pixel, 視野 2.7') とよく一致している。

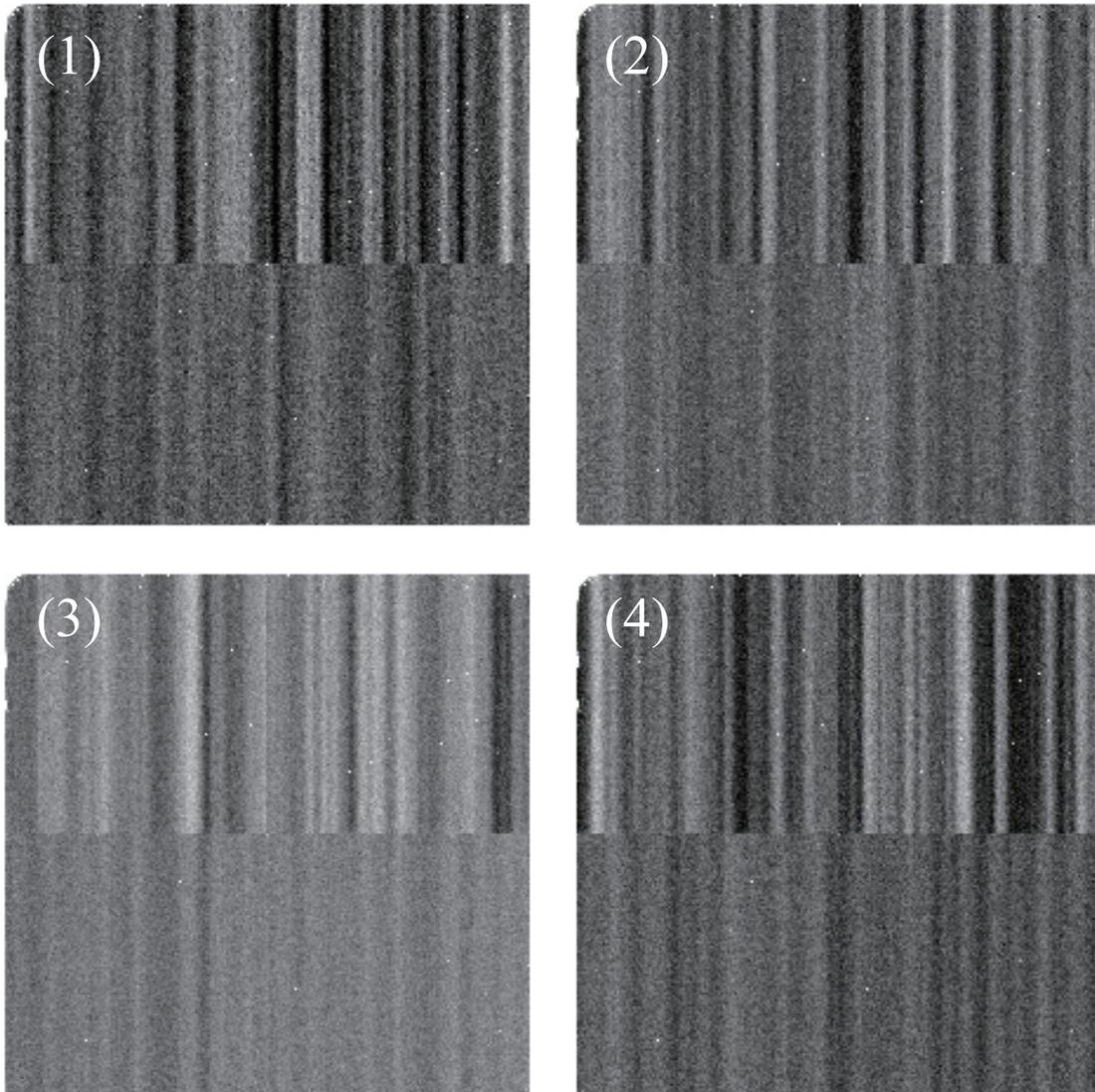


Fig. 6. Subsequently (from (1) to (4)) obtained dark images with an exposure of 5 seconds.

NIC performance evaluation

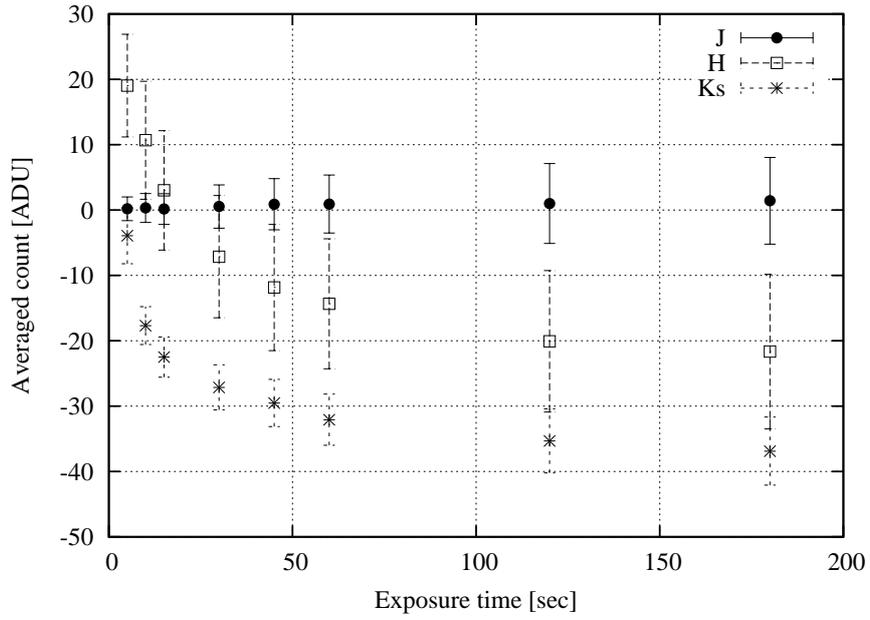


Fig. 7. Correlation between dark counts and exposure time.

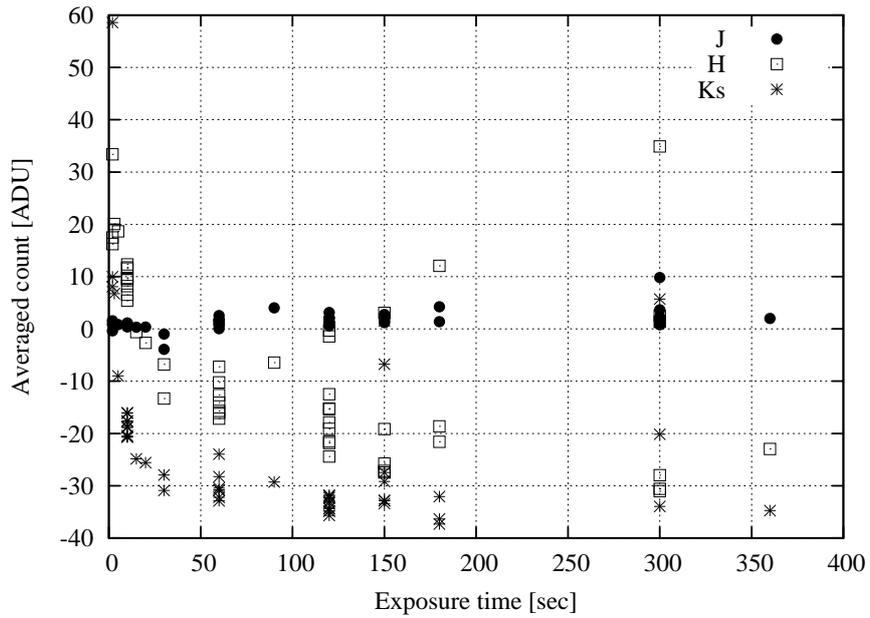


Fig. 8. Dark counts during the test period (except Feb. 15, 2012), plotted against exposure time.

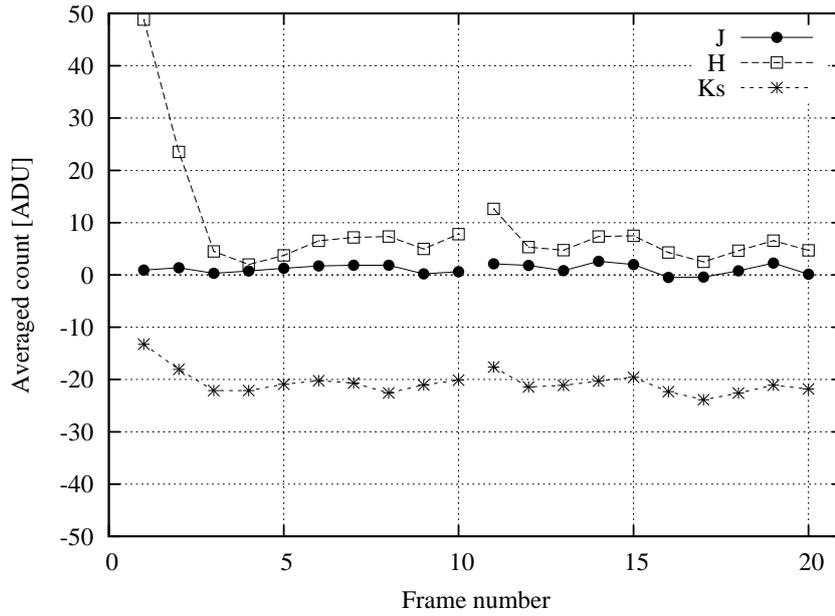


Fig. 9. Frame-by-frame stability of dark counts with an exposure of 10 seconds. The time span of the test is ~ 10 minutes. The beginning of the first and the second set are frame number 1 and 11, respectively.

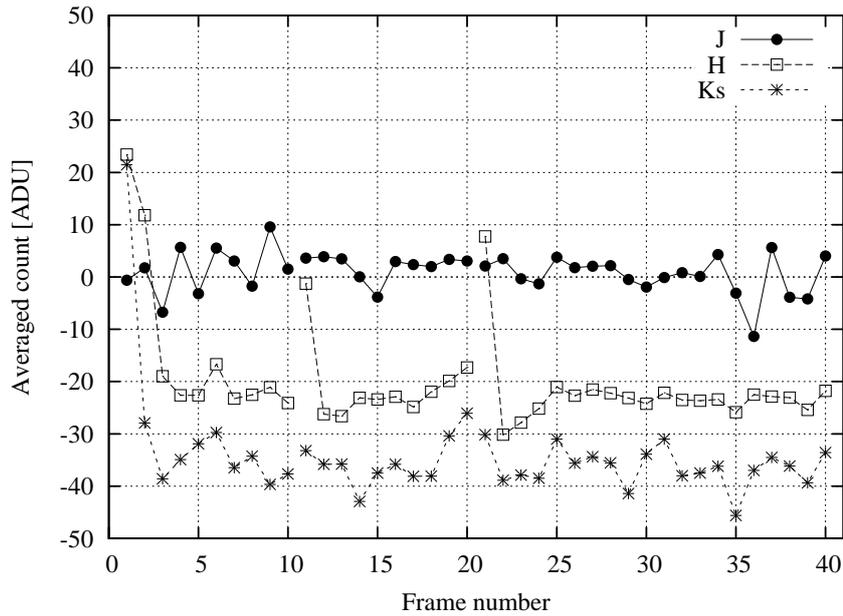


Fig. 10. Frame-by-frame stability of dark counts with an exposure of 120 seconds. The time span of the test is ~ 1 hour and 15 minutes. The beginning of the first, the second, and the third set are frame number 1, 11, and 21, respectively.

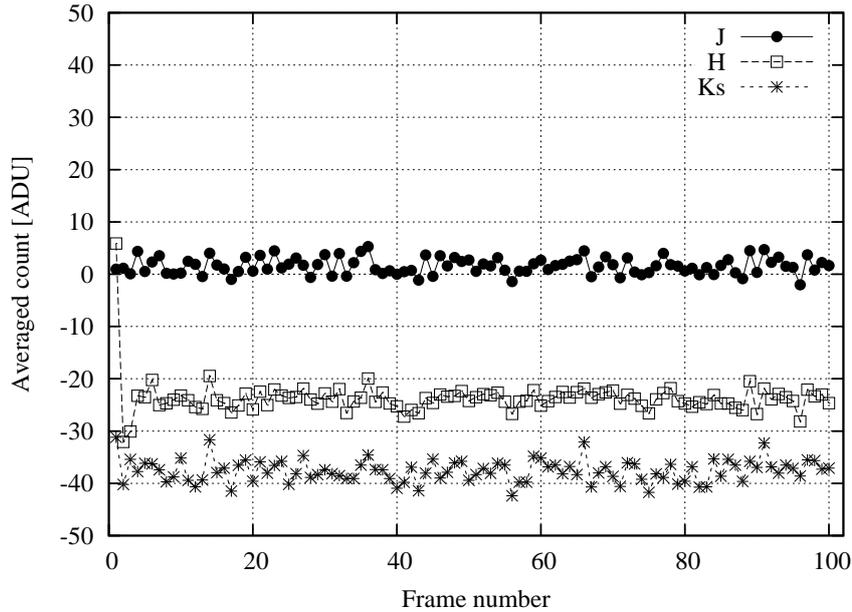


Fig. 11. Frame-by-frame stability of dark counts with an exposure of 180 seconds. The time span of the test is ~ 5.5 hours.

前述の試験では、インストルメントローテータの指令位置角が記録されていなかった。なゆた望遠鏡のインストルメントローテータの指令位置角と NIC 画像の位置角の関係を調べるための追加試験を行った。測定夜の天候が不安定であったため、十分な精度で調べることができなかったが、インストルメントローテータの指令位置角 0° の時、NIC の Y 軸はほぼ ($\pm 1^\circ$ の精度で) 南北方向に沿っていることがわかった。したがって、特殊な観測を除き、インストルメントローテータの指令位置角は 0° で観測を行うべきであろう。

2-3. フラット

(a) ドームフラット

2-4. でも述べるが、NIC はピクセルスケールが非常に小さいために、スカイフラットを作ることが困難である。ドームフラットやトワイライトフラットによる感度ムラの補正が必要である。従来、西はりま天文台の可視撮像装置 MINT では、ドームフラットによる感度ムラの補正が行われてきた。しかしながら、ドームフラットが均一の輝度を持っているという保証はない。したがって、ここではドームフラットを評価し、その利用可能性について検討を行った。なゆた望遠鏡エンクロージャ仕様書によると、フラットフィールドスクリーン、及び照射光設備の仕様は表 4 の通りである。つまり、輝度の均一性は 2% しか保証されていないことに注意しなければならない。

光度の均一性を調べるために、調光量は 50% で固定し、インストルメントローテータを 30° 間隔で回転して NIC を用いて撮像した (試験日 2011 年 7 月 26 日)。撮像時、望遠鏡を真南に向け、仰角は 40° 、エンクロージャの方位角は、なゆたの指向方位角から $+73^\circ$ に設定した。その結果を図 12-14 に示す。このドームフラット試験を通じて、インストルメントローテータを回転することによって、その輝度こう配が変化していることがわかった (図 12-14)。輝度こう配は、1-2% 程度で、フラットスクリーンの仕様を満たしているが、決

Table 4. フラットフィールドスクリーン、及び照射光設備の仕様.

スクリーン材料：	白地で反射率の安定している素材とする。 サイズは 2.2m 角 望遠鏡を約 40° の角度へと向けた高さ。 エンクロージャーの扉より 90° 以内の位置に設置。 有効面積：2.1m ² 平均照度分散用に LED の多球ランプを 2 灯設置。
照射時の光度の均一性：	2.0%

して十分な測光精度であるとは言いがたい。その原因として、ドームフラットスクリーンがなゆた主鏡と比較して十分大きくない、望遠鏡の向きがフラットスクリーンの中心を向いていない、ドームフラットに輝度ムラがある、こと等が考えられる。特に、目視から、望遠鏡の向きがフラットスクリーン中心から有意にずれていることがわかった。

そこで、ケラレによる輝度ムラを緩和するために、望遠鏡の方位角と仰角を変化させることによって、その輝度絶対値の変化を調べた。図 15 はその結果である。望遠鏡の方位角が 73.7°、方位角が 35.7° の時、ケラレがもっとも小さいことがわかった。

図 16 は、ドームフラットから得られた感度の度数分布（画面全体の平均値で規格化、ピン幅 0.01 に設定、縦軸をリニアスケール（左）とログスケール（右）で表示）を表している。特に J バンドの検出器で感度ムラが大きいことがわかる。感度が画面平均値の 0.4 未満の画素を欠損画素と定義した時の、欠損画素数と欠損画素率はそれぞれ、2129 個と 0.21%(J)、451 個と 0.04%(H)、366 個と 0.03% (Ks) である。

(b) トワイライトフラット

日の入り直後あるいは日の出直前の空を観測して取得するのがトワイライトフラットである。2011 年 11 月 22 日の日の入り直後に、望遠鏡を天頂方向に向けて取得した。空が暗くなるとともに、露出時間を上げた（5-360 秒、3 バンド共通）。図 17 は、各バンド 1 秒あたりの取得カウントの時間変化である。J, H での空は時間とともに急激に暗くなり、数秒露出で 10,000ADU 弱のカウントを得るには、日の入り数分後から 10 分後までに観測する必要がある。Ks は J, H に比べカウントが低く、高い S/N を得るためにはより長い露出時間に設定する必要があると考えられる²。ただし、特に Ks の空は熱放射が支配的だと考えられ（永山 2004）、夏季の気温の高い頃にはプランク輻射にしたがって強度が増すと予想される。

天体画像の感度補正に用いるための画像は、フラットの生画像をダーク差し引きを行なった上で重ね合わせ（IRAF imcombine, combine=sum）し、画像の平均値が 1 となるように規格化して作成した（図 18）。作成したフラット画像内の適当な 5×5 ピクセル領域のカウント平均値と標準偏差を求めた。標準偏差 / 平均値は、8 箇所平均で J:14%, H:8.8%, Ks:17%であった。

ドームフラットではインストルメンタルローテータの回転に伴うフラットパターンの変化が見られた。この現象がトワイライトフラットでも発生するのを確認するために、試験を行った。望遠鏡指向は天頂に固定し、ローテータ回転角を 0°, 45°, 90°, 135°, 180° に変化させてトワイライトを観測した。ローテータを回転して得た画像を、回転させずに得た画像で割った結果を、図 19-21 に示す。ダーク画像で見えた再現性のない

² 3 バンド個別に露出時間を設定して撮像するモードも準備されているが、しばしば異常なパターンが現れる問題があり、執筆時点では実用化されていない。

NIC performance evaluation

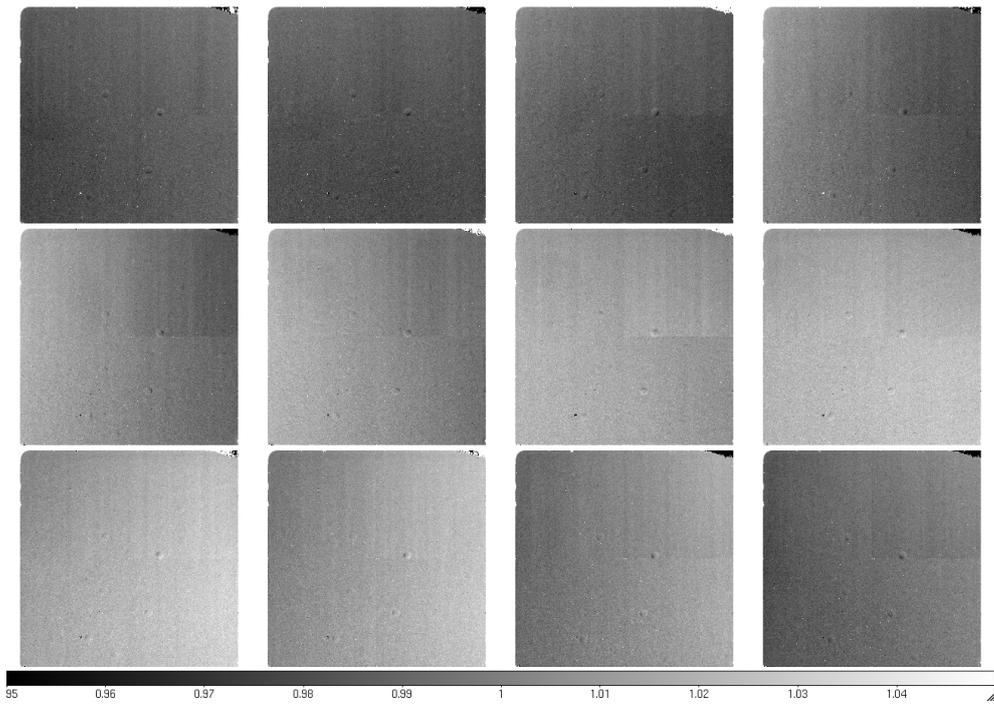


Fig. 12. J-band flat images taken at the rotation angle from 0° (top left) to 360° (bottom right).

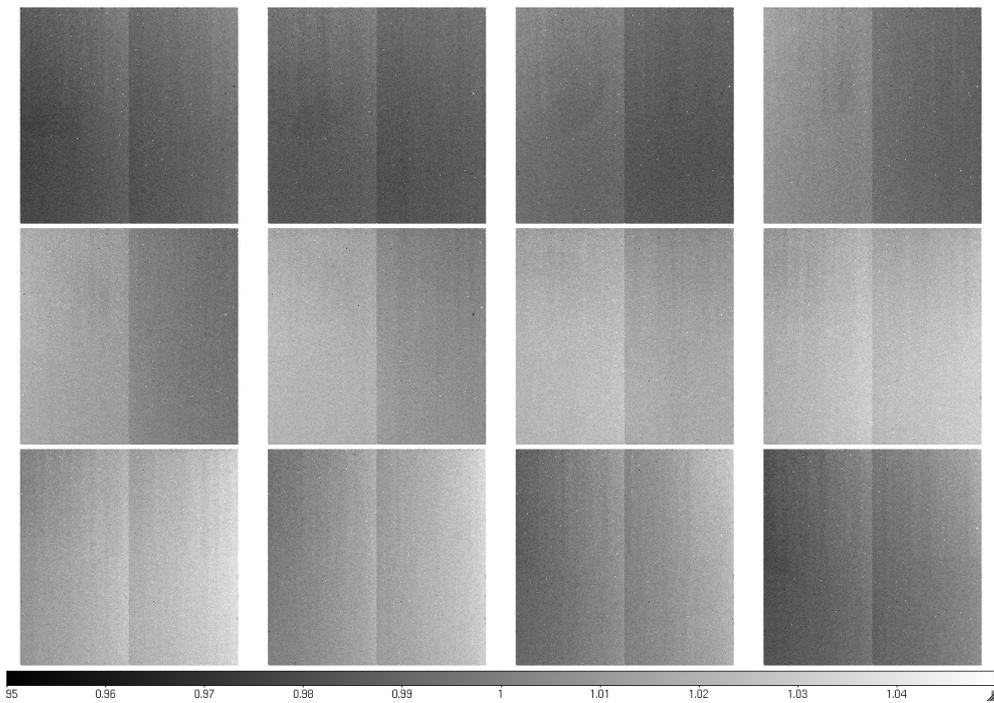


Fig. 13. H-band flat images taken at the rotation angle from 0° (top left) to 360° (bottom right).

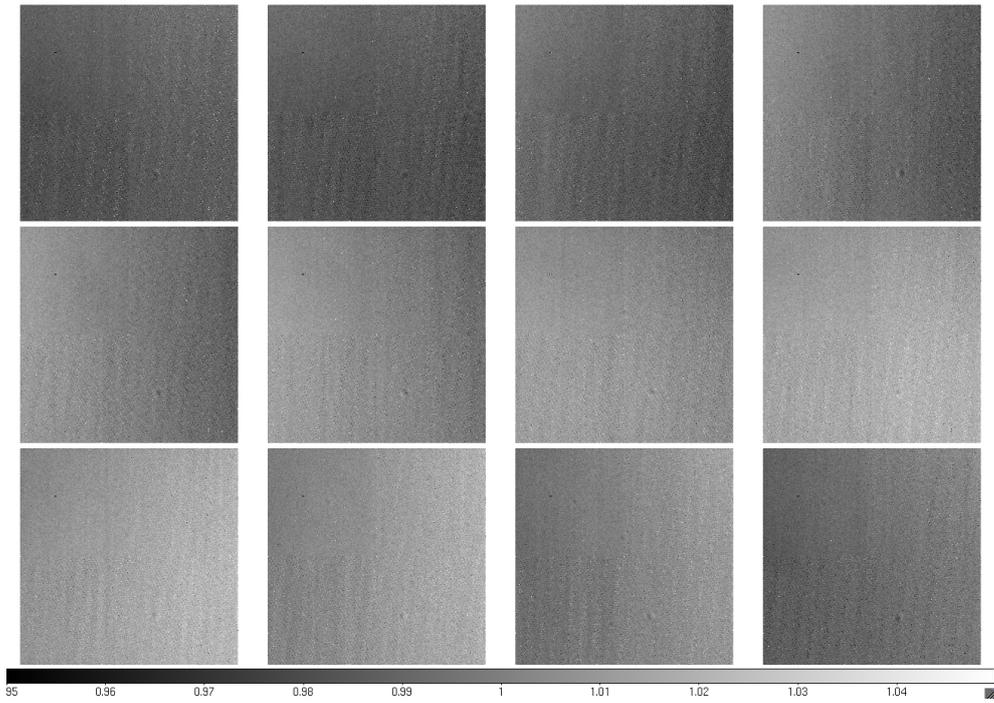


Fig. 14. Ks-band flat images taken at the rotation angle from 0° (top left) to 360° (bottom right).

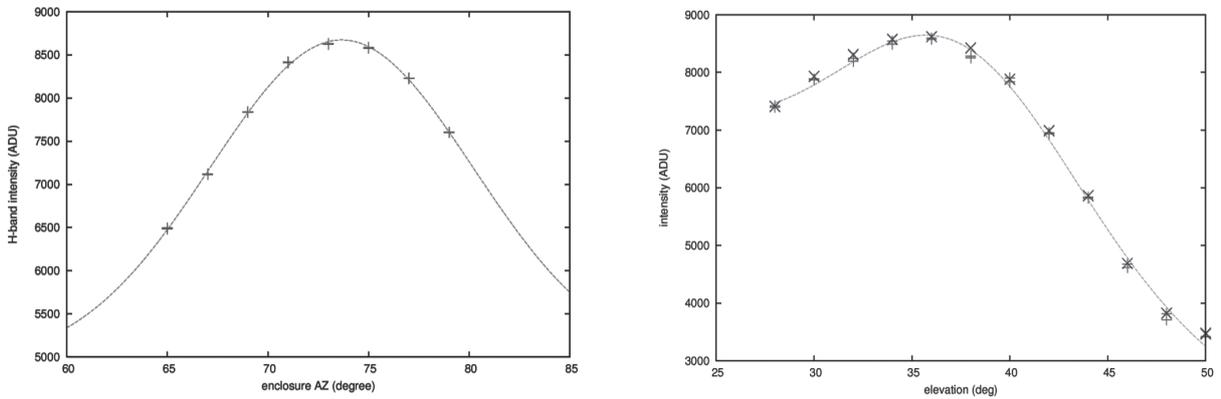


Fig. 15. Average of flat images at different azimuth angles (left) and elevation angles (right).

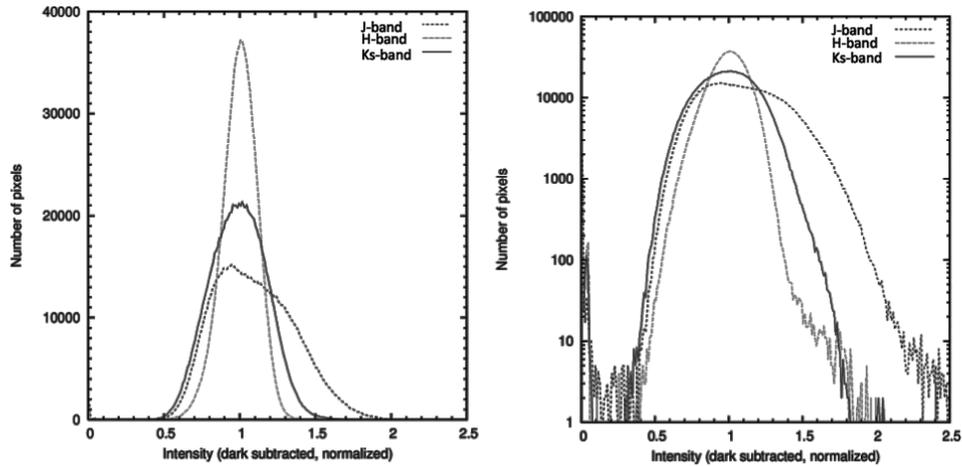


Fig. 16. Histogram of the sensitivity in linear scale (left) and logarithm scale (right).

縦パターンが見え、フラットパターンは消えている。ローテータの回転に伴うフラットパターンの変化は現れなかった。この現象の原因は、望遠鏡に対する観測装置光学系の回転ではないことがわかった。つまりドームフラットでは光源の一様性に問題があるということであり、トワイライトフラットの方がより適切であるといえる。以下の画像処理ではトワイライトフラットを用いる。

2-4. 西はりま天文台での夜天光強度

地上観測において、スカイバックグラウンドの明るさは、近赤外波長域の方が可視波長域よりも高い。昼間に太陽紫外線を吸収して励起された地球大気の上層約 90km の大気分子は、夜間に可視近赤外線を発光する（大気光）。特に、近赤外波長域では、OH による夜光が著しく明るい。波長 2 ミクロンより長波長側では、望遠鏡や周囲からの熱輻射が支配的になる。

表 5 は、2011 年 1 月 31 日の観測画像を元に、夜天光の明るさを調べたものである。輝度較正のため、2MASS カタログデータを用いた。西はりま天文台でのこのデータを取得時の夜天光の明るさは、海外の観測サイトでの夜天光の明るさとほぼ一致した。ただし、オリオン大星雲近傍領域の観測画像を用いたため、星雲の輝度を含めている可能性がある。

さらに、Ks バンドに限り、外気温の異なる他の 2 晩のスカイ値を調べた。8 月 31 日 11.1-11.7 mag/arcsec²（外気温 25°C）、10 月 26 日 12.7mag/arcsec²（外気温 13°C）だった。夏場の観測では、有意にスカイバックグラウンドが高いことが明らかである。つまり、スカイで飽和しないよう夏場の観測は要注意である。

J バンドのスカイバックグラウンドのレベルが小さいことに注意が必要である。2011 年 1 月 31 日のスカイ値は、0.8 ADU/秒 (J)、15 ADU/秒 (H)、7.7 ADU/秒 (Ks) であった。NIC は画素サイズが小さいので、単位画素あたりのスカイレベルが低く、オブジェクト画像からスカイフラットを作る事が困難であることがわかる。つまり、ドームフラットやトワイライトフラットの取得が極めて重要である。この件に関しては、前述 (2-3. 章フラット) の通り、トワイライトフラットを用いた解析を推奨する。

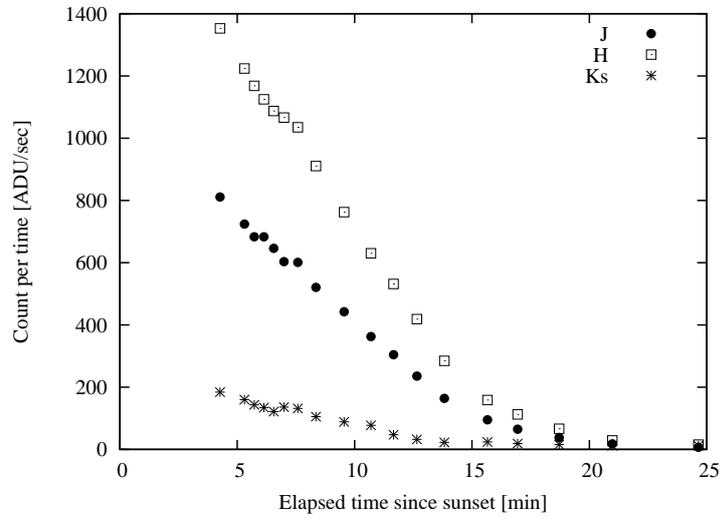


Fig. 17. Time-variation of twilight intensity measured on Nov. 22, 2011.



Fig. 18. Combined twilight flat images in J (left), H (center) and Ks (right) bands.

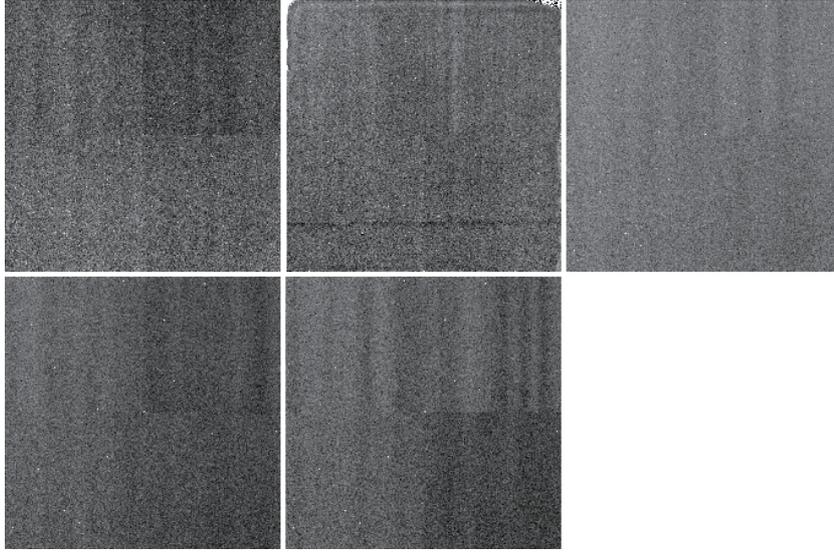


Fig. 19. J divided twilight flat images for several rotation angles of the instrumental rotator. The rotation angles of the left-top, center-top, right-top, left-bottom, and center-bottom images are 0° , 45° , 90° , 135° , and 180° , respectively.

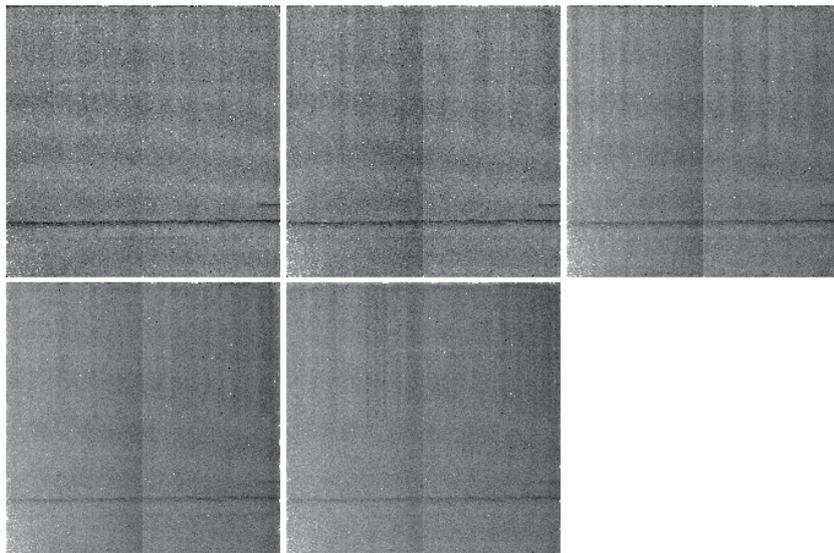


Fig. 20. H divided twilight flat images for several instrumental rotator angles. The rotation angles of the images are the same as Fig.19.

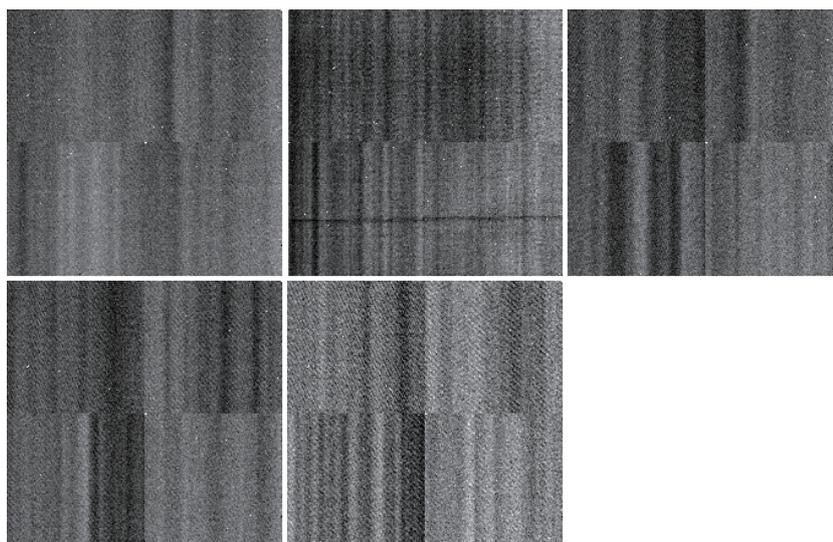


Fig. 21. Ks divided twilight flat images for several instrumental rotator angles. The rotation angles of the images are the same as Fig.19.

Table 5. Sky brightness at Nishi-Harima Astronomical Observatory in comparison with other sites. (1) Outside temperature was -3.2°C at the time of measurement. Humidity was 63%. (2) Nagayama 2004, PhD dissertation.

(Unit: mag/'')	J band	H band	Ks band
NHAO ¹	15.4	13.5-13.7	13.0
Mauna Kea	15.6	13.6	13.4
IRSF ²	15.0-15.5	13.2-14.4	12.0-13.2

2-5. 測光性能

(a) 画像処理

測光を行なう際の画像処理について簡単に説明する。近赤外観測画像の標準的な手法にしたがって、以下の処理を施した (図 22 参照)。なお、以下のプロセスを実行するスクリプトを作成した。

- (1) ダーク差し引き
- (2) フラット補正: トワイライトフラット使用。
- (3) バッドピクセル補正: 常に決まった位置に現れるバッドピクセルを周りのピクセル値で補間。IRAF fixpix 使用。
- (4) ホットピクセル、ダークピクセルを除去: IRAF cosmicrays 使用
- (5) スカイ画像作成: 観測対象天体または近傍の星の少ない領域のディザリング画像を位置合わせすることなく、重ね合わせる (中間値)。IRAF imcombine (combine=median, scale=median) 使用。

- (6) スカイ差し引き: 上記で作成したスカイ画像を天体画像から差し引く。スカイ画像を各天体画像のスカイレベルを合わせるためにスケーリングしておく。
- (7) 縦パターン除去: 検出器由来の縦パターンを差し引く。天体が少ない場合は星の写っていない行(典型的には20-100行分)を平均化し、縦パターンのプロファイルを得る(「Sampling法」と呼んでいる)。天体が多い場合は、画像上半分(ただしパッドピクセルの多い上端部分は除く)および下半分に対して、列のピクセル値の中間値を取ることにより、プロファイルを得る(「Median法」と呼んでいる)。Median法の場合、明るい星のある、あるいは多くの星が写る列では、パターンを過大に見積り、引きすぎてしまうことがある。うまく引けない場合は、縦パターン除去をしないこともある。
- (8) 画像位置合わせ: ある特定の星の中心位置を測り、ディザリングセット内のすべての画像で星像が同じピクセルに位置するように平行移動する。
- (9) 重ね合わせ: IRAF imcombine (combine=average, zero=median) 使用。

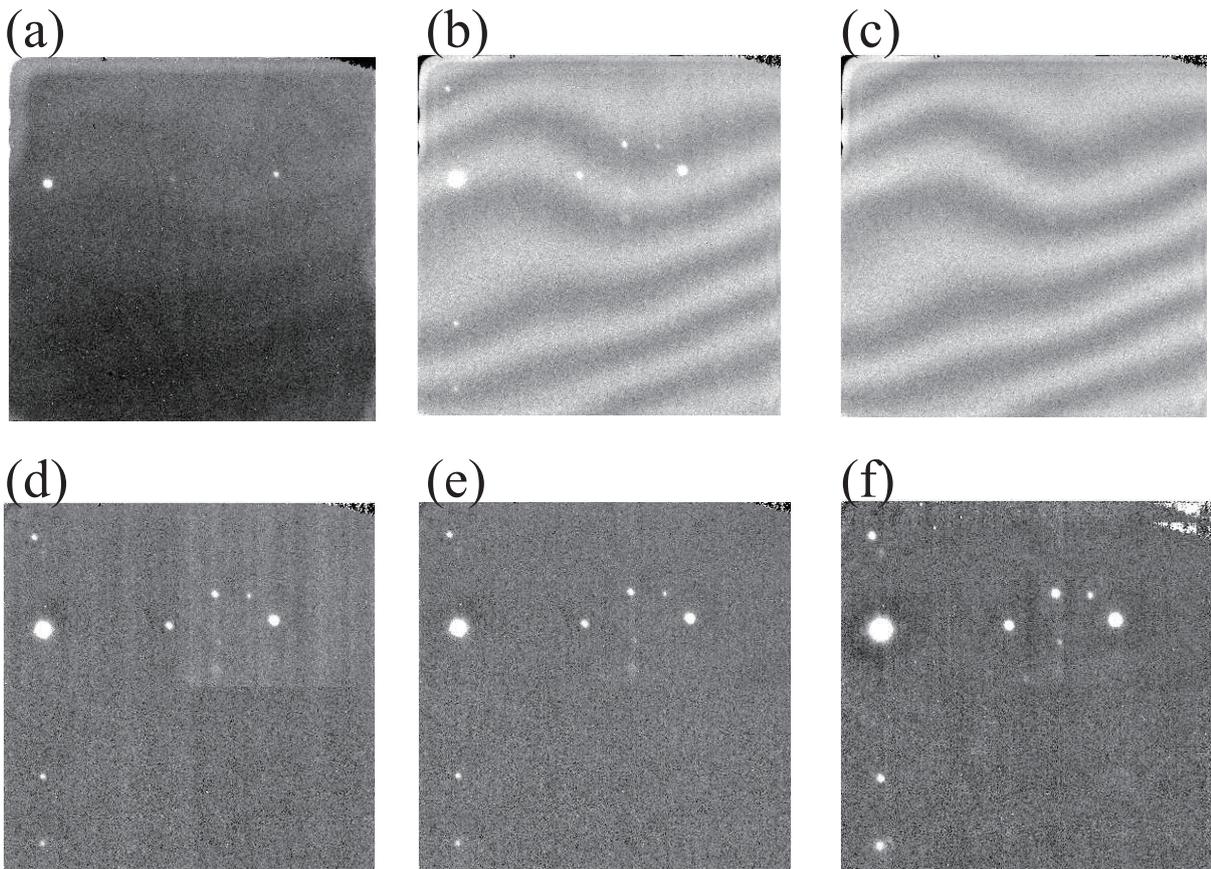


Fig. 22. Reduction process. (a) Raw data. (b) Image after (4). (c) Sky frame generated in (5). (d) Sky-subtracted image after (6). (e) Column-pattern-subtracted image after (7). (f) Final combined image.

(b) 限界等級

限界等級を求めるために、2012年1月25日(外気温 -4.3°C)に散開星団 M37 を観測した(図 23)。1回あたりの露出時間は J,H,Ks とともに 15 秒、半径 $10''$ の 10 点ディザリング観測を行なった。IRAF phot タスクを用い、アパーチャ測光を行なった。天体の FWHM は J: 13.6 pix ($2.2''$), H: 11.4 pix ($1.8''$), Ks: 11.8 pix ($1.9''$) であり、アパーチャ半径は FWHM の 2.5 倍の J: 34 pix ($5.4''$), H: 32 pix ($5.1''$), Ks: 30 pix ($4.8''$) とした。phot が算出する測光誤差に背景スカイのフォトンノイズを組み入れるために、(6) で差し引いたスカイ画像の平均値を足し戻す処理を、測光に先立って行った。視野内の最も明るい星の 2MASS 等級を参照して、測光等級を補正した。(7) の中間値による縦パターン除去を行った場合と行わない場合について、それぞれ測光した。それぞれの測光誤差を比較したものを図 24 に示す。若干であるが、中間値によるパターン除去を行ったほうが、誤差が小さくなる。

図 25-27 は、 $S/N = 1.086/\Delta m$ (Δm : 測光誤差) で測光誤差を S/N に変換したものである。中間値によるパターン除去を行った画像の測光結果に対して $S/N = a \cdot 10^{-0.4m}$ (m : 等級) の関数をフィットさせ、 $S/N = 10$ となる等級を限界等級とした。結果は J: 14.3 mag, H: 14.7 mag, Ks: 14.1 mag であった。

2012年2月11日(外気温 -1.3°C)に観測した散開星団 NGC 2420 (図 28) についても、同様に限界等級を求めた。1回あたりの露出時間は J,H,Ks とともに 120 秒、半径 $10''$ の 10 点ディザリング観測であった。FWHM は J: 11.3 pix ($1.8''$), H: 10.8 pix ($1.7''$), Ks: 10.3 pix ($1.6''$) であり、アパーチャ半径はそれらの 2.5 倍とした。得られた限界等級は J: 16.6 mag, H: 16.7 mag, Ks: 15.9 mag であった(図 29)。

限界等級の制約条件を議論する。表 6 は、スカイバックグラウンドのノイズ N_{sky} と読み出しノイズ N_{read} を比較したものである。J バンドでは読み出しノイズが卓越している。したがって多回数サンプリングで読み出しノイズを小さくすることにより限界等級が深くなることが期待できる³。一方、H,Ks の NGC 2420 (露出: 120 秒/回) では、スカイバックグラウンドノイズと読み出しノイズが同程度、またはスカイバックグラウンドノイズが上回っている。Ks のスカイ強度は気温に大きく依存するため、夏場はスカイバックグラウンドノイズがさらに卓越すると考えられる。

Table 6. Comparison of sky background noise and readout noise. n represents the dithered (i.e., combined) number. N_{sky} , N_{read} , and N_{total} stand for sky background noise, effective readout noise, and total noise, respectively. Sky counts in ADU are converted to electron unit using an effective conversion factor (C.F), which is calculated with equation: $n \times (single\ C.F)$. Then, $N_{sky}[e^-] = \sqrt{Sky[e^-]}$ is used. Effective readout noise is obtained by $N_{read} = \sqrt{n} \times (single\ readout\ noise)$. $N_{total}^2 = N_{sky}^2 + N_{read}^2$ is assumed.

Band	Object	Exp[s] \times n	Sky[ADU]	$N_{sky}[e^-]$	$N_{read}[e^-]$	$N_{total}[e^-]$
J	M37	15×10	19	42	160	160
	NGC 2420	120×10	81	86	160	180
H	M37	15×10	230	150	240	280
	NGC 2420	120×10	1100	330	240	410
Ks	M37	15×10	120	110	260	280
	NGC 2420	120×10	750	270	260	370

³ 多回数サンプリングで観測するモードも用意されているが、しばしば異常なパターンが現れる問題があり、執筆時点では実用化されていない。

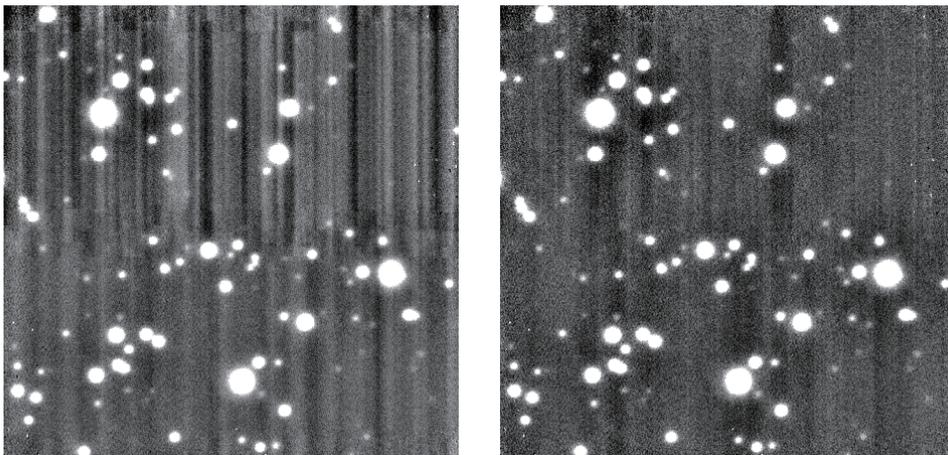


Fig. 23. M37 in H band. (Left) Without column-pattern subtraction. (Right) With “median” column-pattern subtraction.

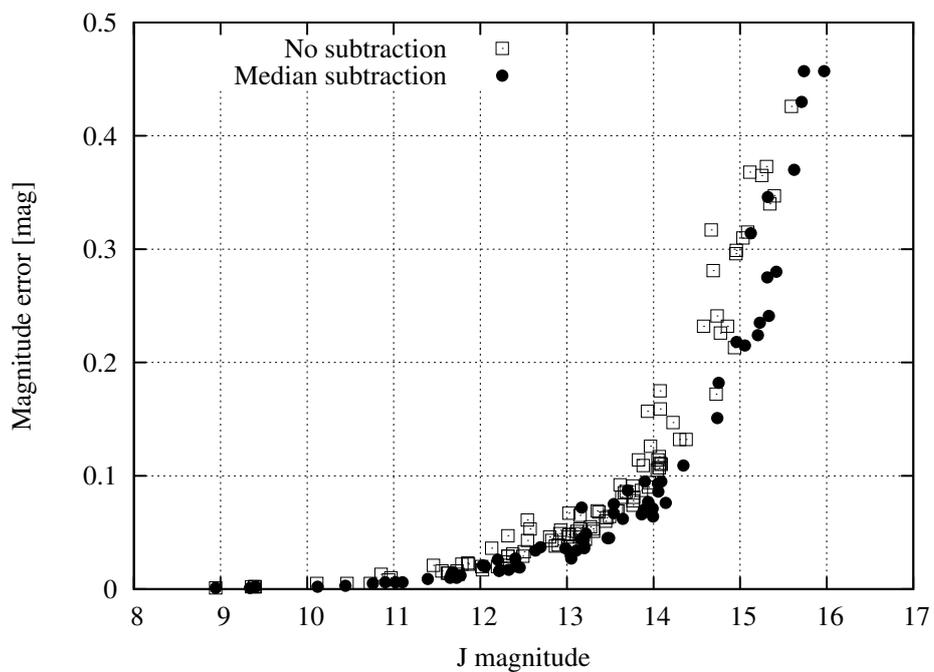


Fig. 24. M37: J magnitude - error diagram.

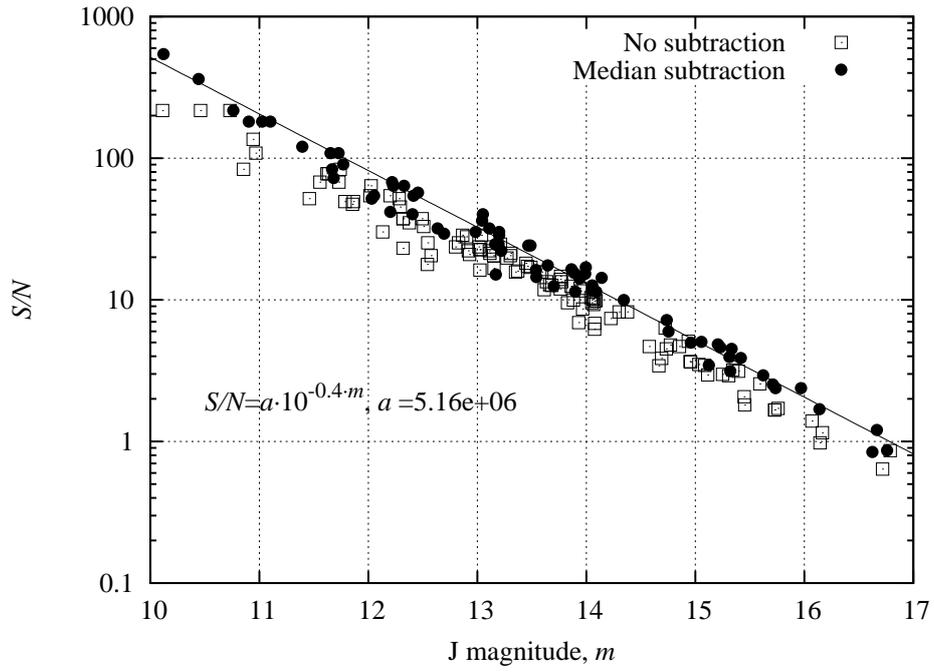


Fig. 25. M37: J magnitude - S/N diagram.

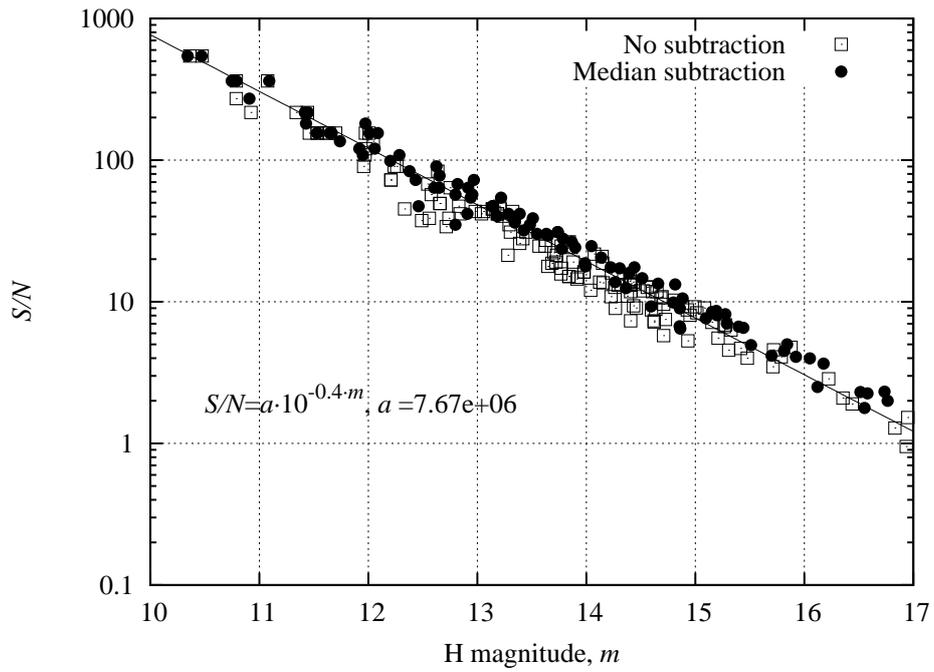


Fig. 26. M37: H magnitude - S/N diagram.

NIC performance evaluation

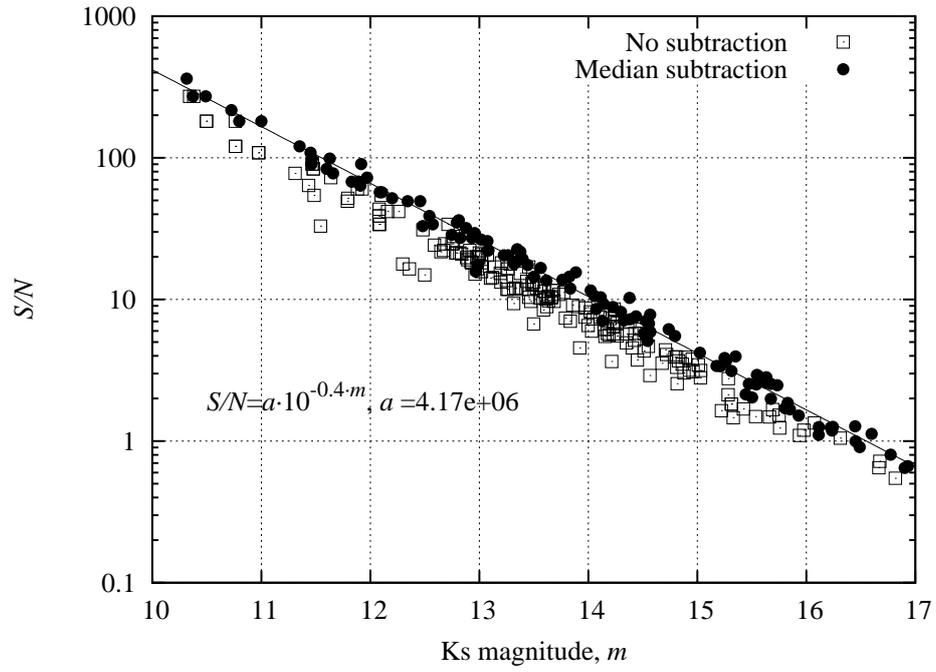


Fig. 27. M37: Ks magnitude - S/N diagram.

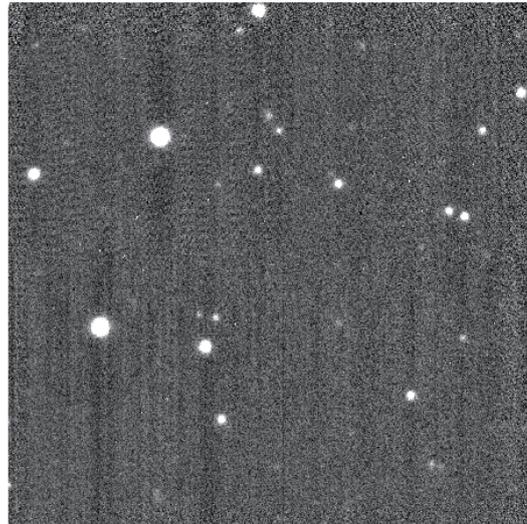


Fig. 28. NGC 2420 image in Ks.

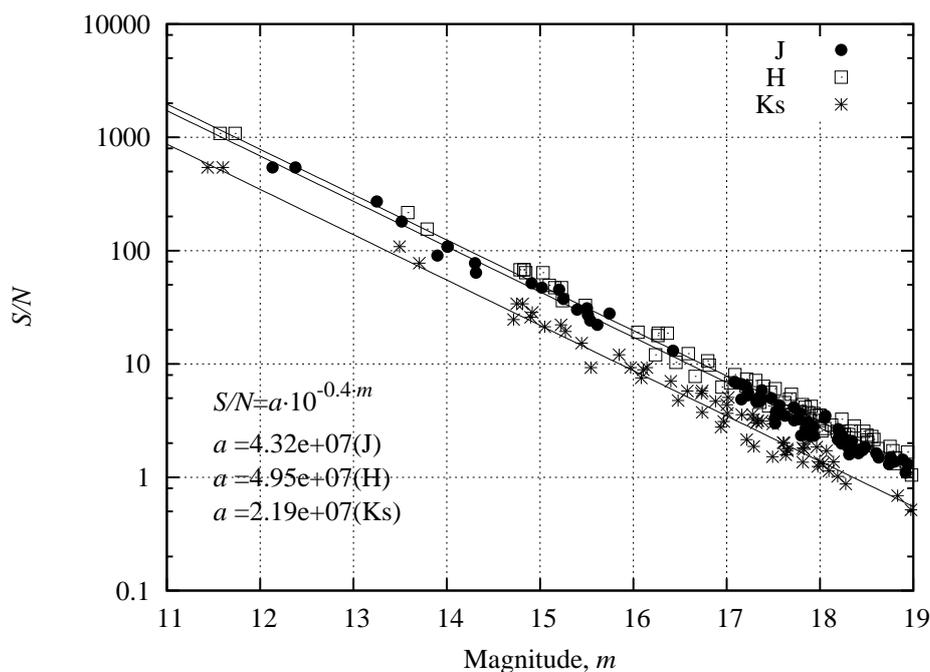


Fig. 29. NGC 2420: J, H, Ks magnitude - S/N diagram.

(c) 測光精度

ここではフラット補正の誤差や大気状態変化の影響を含めた実質的な測光精度を見積もる。鳴沢他 (2012) が 2012 年 1 月 17 日に取得した 10 秒露出 \times 10 点ディザリング (半径 10") \times 26 セットの食連星 V523 Cas 観測データを用いる (図 30)。図 31-33 は、視野内の 4 天体 (V523 Cas は含まない) の未較正等級をエアマスに対してプロットしたもの、および 1 天体 (2MASS 等級: J10.76, H10.15, Ks9.94) を参照星として求めた相対測光等級をプロットしたものである。アパーチャ半径は、観測中の代表的な FWHM の J:8.4 pix (1.3"), H:8.1 pix (1.3"), Ks: 7.3 pix (1.2") の 2.5 倍とし、すべてのセットに対して共通の値を適用した。結果を表 7 に示す。よりよいフラット画像の追究や星像を同じピクセルに結像させ続ける観測などにより、さらに測光精度を高められる可能性がある。

エアマス 1.0-2.0 の範囲で参照星の未較正等級を用いて大気減光量を求めた (図 34)。J:0.06 mag/airmass, H:0.05 mag/airmass, Ks:0.09 mag/airmass が得られた。ただし、大気減光量は観測日の大気状態によって大きく変わる可能性がある。

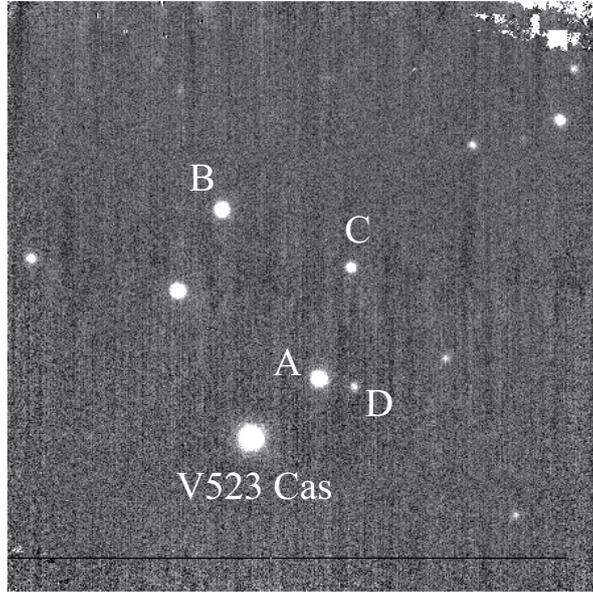


Fig. 30. J band image of V523 Cas and the nearby stars.

Table 7. Measured magnitudes and precisions. All the values are in magnitude. The precisions are defined as the standard deviation of magnitude fluctuation during the observation.

Object	J mag.	J precision	H mag.	H precision	Ks mag.	Ks precision
B	11.226	0.014	10.710	0.005	10.626	0.011
C	12.983	0.074	12.699	0.025	12.897	0.044
D	14.072	0.152	13.753	0.054	13.700	0.103

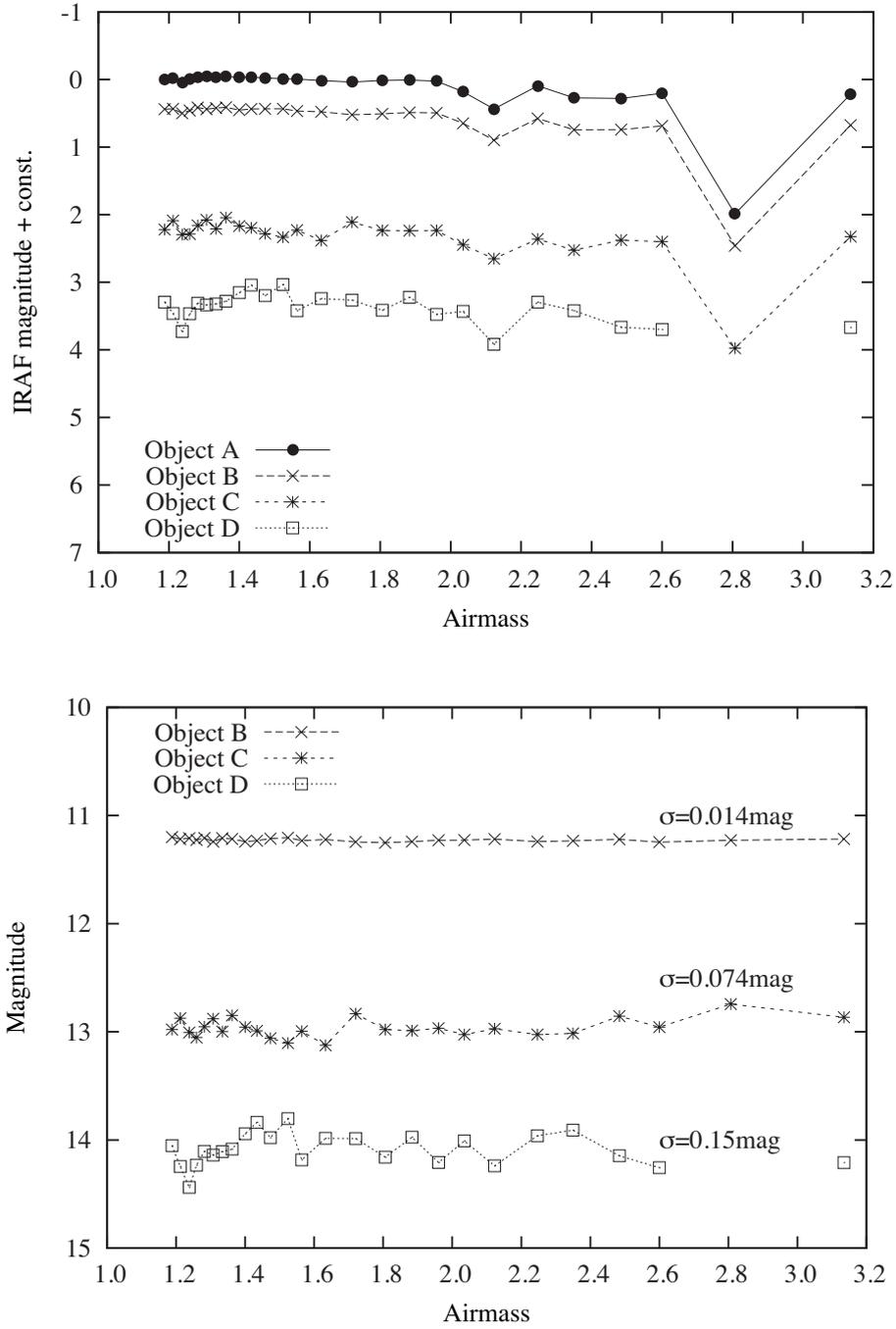


Fig. 31. (Top) J uncalibrated magnitude. Magnitude are offset by a constant. Airmass increased as time. Cloud passed around airmass ~ 2.8 , thus object D was undetectable. (Bottom) J magnitude calibrated with use of object A as the reference.

NIC performance evaluation

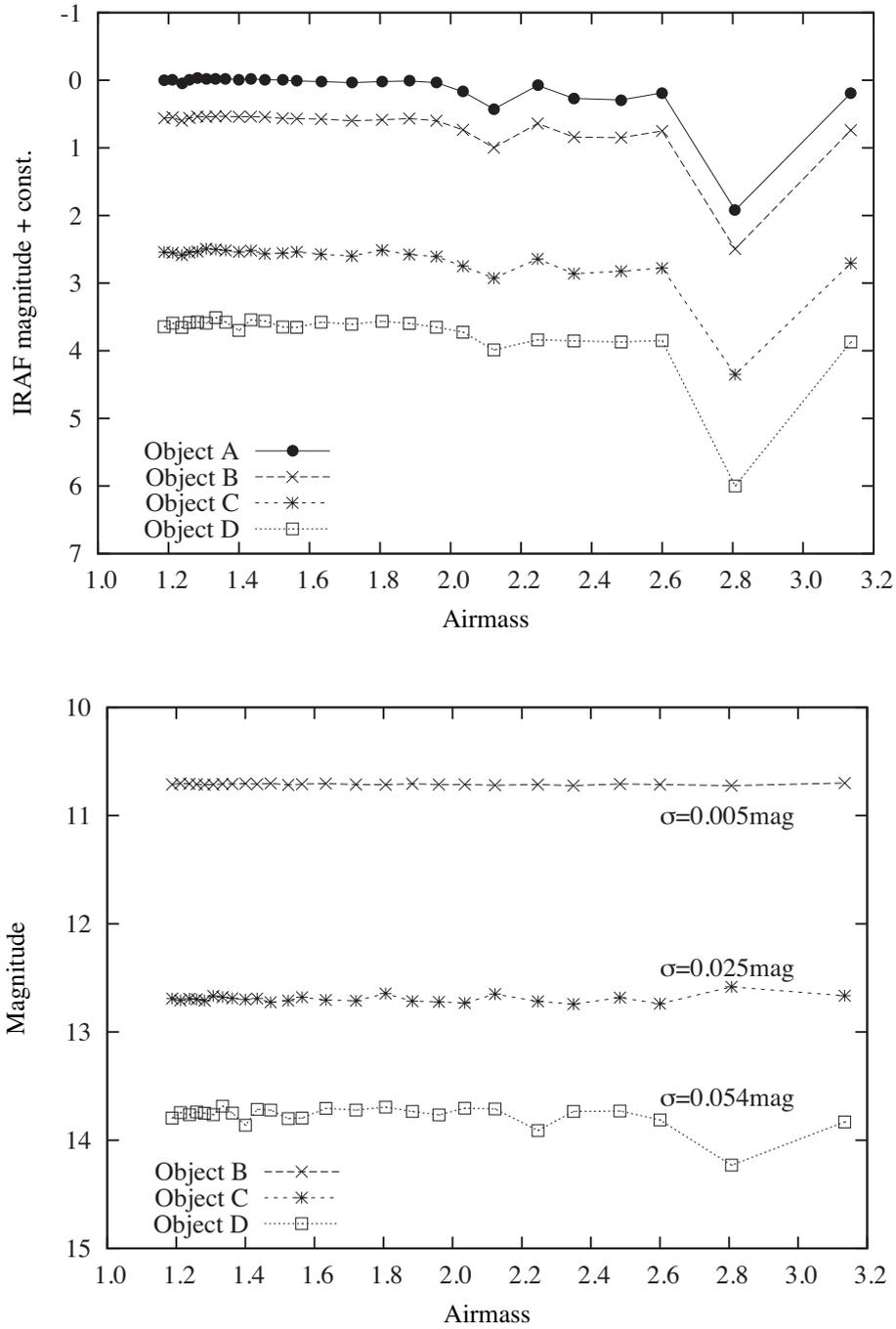


Fig. 32. (Top) H uncalibrated magnitude. (Bottom) H magnitude calibrated with use of object A as the reference.

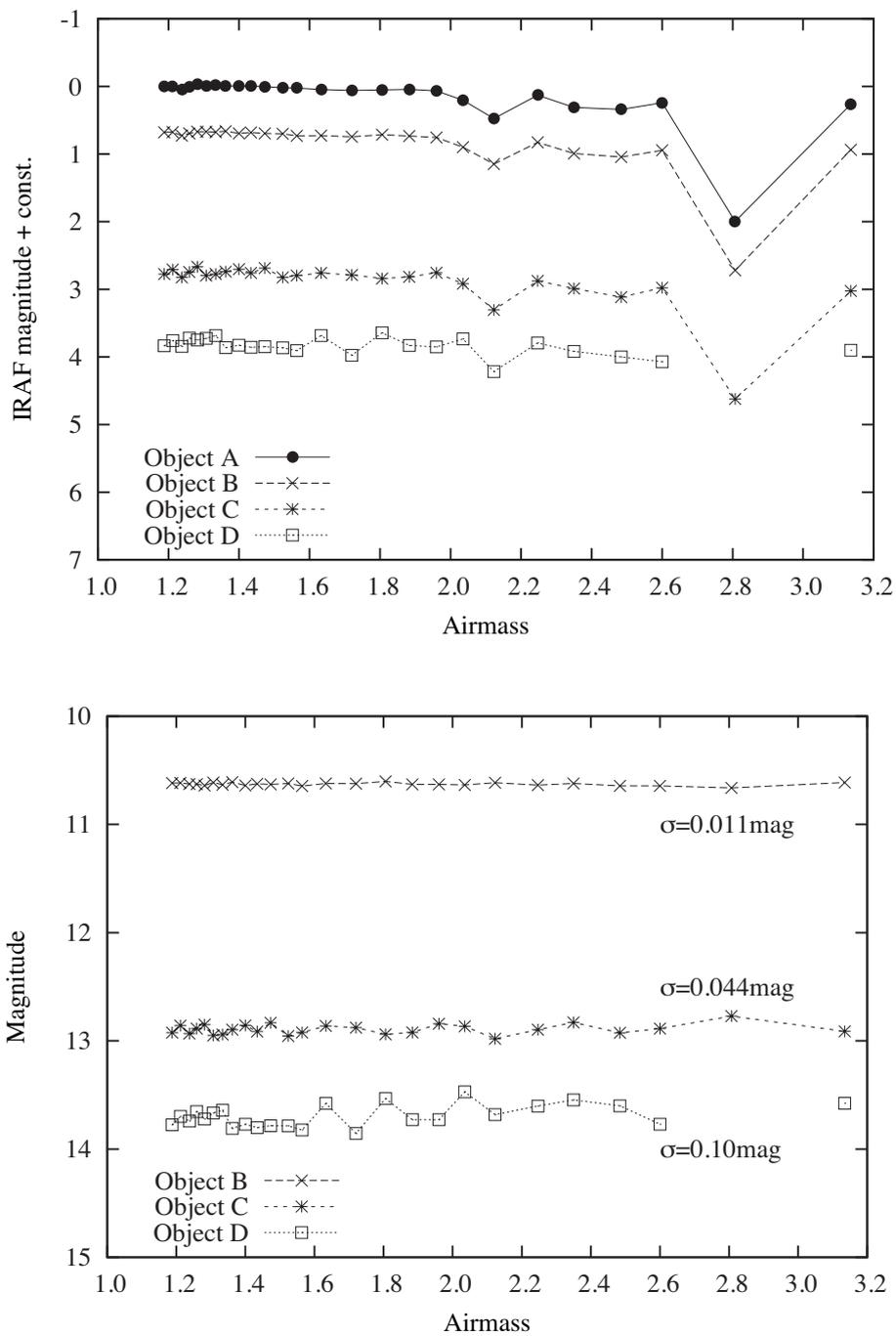


Fig. 33. (Top) Ks uncalibrated magnitude. Object D at airmass ~ 2.8 was undetectable due to the passing cloud. (Bottom) Ks magnitude calibrated with use of object A as the reference.

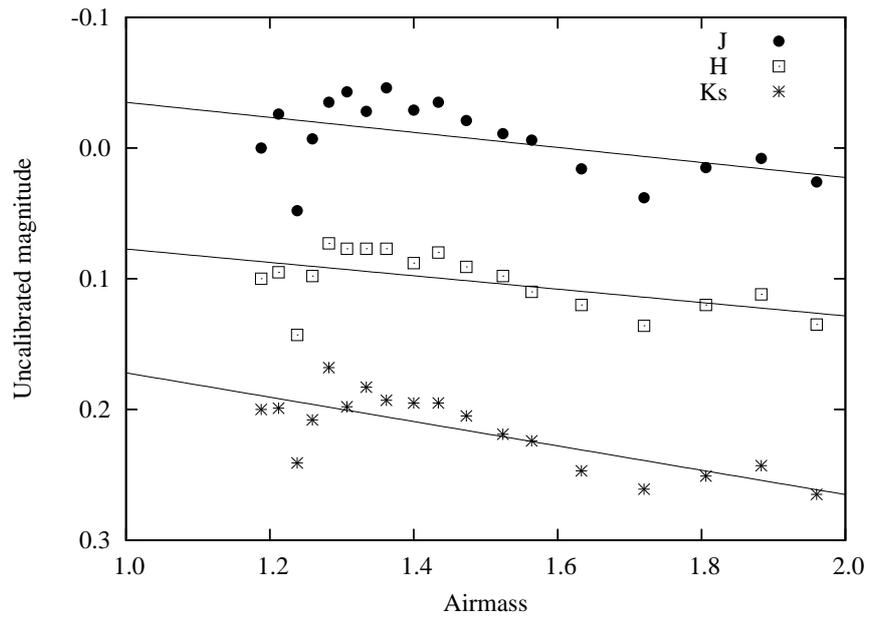


Fig. 34. Atmospheric extinction. Uncalibrated JHKs magnitudes of object A are plotted. JHKs magnitudes are vertically offset for clarity. The best-fit lines ($Mag = a \cdot Airmass + b$) are overlaid, where $a = 0.06$ (J), 0.05 (H), and 0.09 (Ks).

3. まとめ

以上の性能評価試験の結果を表8にまとめる。今後は、科学観測を実施しながら性能の向上に努めていく予定である。

Table 8. Performance of NIC in Feb. 2012. All the data were obtained with single sampling mode.

	Unit	J	H	Ks	Remarks
Conversion factor	e^-/ADU	9.2 ± 0.2	9.8 ± 0.2	9.4 ± 0.2	Motor electricity off.
Readout noise	e^-	50 ± 4	75 ± 4	83 ± 5	Motor electricity off.
Linearity limit	ADU	$\sim 8,000$	$\sim 8,000$	$\sim 8,000$	Incl. counts before the first read.
Field of view	arcmin ²	2.73×2.73	2.73×2.73	2.73×2.73	Measured.
Pixel scale	arcsec/pix	0.16	0.16	0.16	Measured.
Limiting magnitude	mag	14.3	14.7	14.1	15 sec \times 10 dither
		16.6	16.7	15.9	120 sec \times 10 dither
Photometry precision	mag	0.014	0.005	0.011	10 sec \times 10 dither \times 26 set
					Ref:J=10.8,H=10.2,Ks=9.9
					Object:J=11.2,H=10.7,Ks=10.6

NICは、上野宗孝氏、上水和典氏（宇宙研）、圓谷文明氏（西はりま天文台）を中心に、設計および開発された観測装置です。開発に携われた、住友重機械工業株式会社の皆様、光学系を設計された株式会社ジェネシアの皆様、回路系を製作されたリンクス株式会社星野氏に心からお礼申し上げます。佐藤修二氏には技術的な助言を頂きました。また、前任者の故森 淳氏（当時、西はりま天文台）および丹羽隆裕氏（元 西はりま天文台、現 八戸高専）、また性能評価試験にご協力くださいました西はりま天文台スタッフの皆様にも感謝申し上げます。

《参考文献》

- 永山貴宏 2004, “近赤外線掃天観測施設 IRSF の開発と銀河面に隠された銀河団の探査”, 名古屋大学博士論文
- 鳴沢真也 高橋隼 永井和男 2012, “西はりま天文台近赤外線カメラ NIC による W UMa 型連星系 V523 Cas の JHK 測光”, 連星系・変光星・低温度星研究会予稿