

木曾105cmシュミット望遠鏡と木曾広視野CCDカメラKWFCによる 広視野多色狭帯域撮像観測

西浦 慎悟^{*1}・宮野 彩^{*1}・根本 明宗^{*1}・長谷川 優子^{*2}

宇宙地球科学分野

(2018年5月24日受理)

NISHIURA S., MIYANO A., NEMOTO A. and HASEGAWA Y.: Wide-field Multi-color Narrow-band Imagings with the Kiso wide-field CCD camera KWFC installed the Kiso 105 cm Schmidt Telescope. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **70**: 73–85. (2018)
ISSN 1880–4330

Abstract

We report that linearities, flux calibrations, and limiting surface brightnesses of narrow-band images obtained using N4873, N5013, and N6750 filter with the Kiso wide-field CCD camera (KWFC) installed to the Kiso 105 cm Schmidt telescope at the Kiso Observatory, Institute of Astronomy, the University of Tokyo. These N4873, N5013, and N6750 filters are tuned to detect of the $H\beta\lambda 4861$, $[OIII]\lambda\lambda 4959, 5007$, and $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ emitted from the ionized hydrogen, oxygen, and sulfur, respectively. The KWFC installed the Kiso 105 cm Schmidt telescope have much wide about $2^\circ \times 2^\circ$ field of view. Setting these narrow-band filters to the KWFC enable to detect of line emissions from HII regions in from nearby spiral galaxy M31 to the spiral galaxies in the Virgo cluster.

Through this work, we found that 1) differences of linearities between the upper region and lower one of KWFC CCD chips were 2.5–2.7% at most, 2) in N5013 and N6750 narrow-band imaging the errors of calculating the magnitude zero-points using the SDSS star data were less than the 0.1 magnitude respect to those using the spectrophotometric standard star, and in N4873 they were less than the 0.2 magnitude, 3) limiting surface brightness for N4873, N5013, and N6750 imagings were around $24.5 \text{ mag}/\square''$ (70 min), $25\text{--}26 \text{ mag}/\square''$ (60 min), and around $23.5 \text{ mag}/\square''$ (about 20 min), respectively.

Keywords: $H\beta$, [OIII], [SII], emission line, extragalactic HII region, narrow-band imaging, wide-field imaging

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 我々は、電離水素起源の $H\beta\lambda 4861$ 輝線、電離酸素と電離硫黄起源の $[OIII]\lambda\lambda 4959, 5007$ 輝線と $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ 輝線に対応した狭帯域フィルター N4873, N5013, N6750による狭帯域撮像データについて、応答の線形性、等級較正の精度、そして、限界輝度を報告する。これらのフィルターは、東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所の105cmシュミット望遠鏡と広視野CCDカメラKWFCに搭載することで、 2° 角四方という広視野の狭帯域撮像を可能にし、近傍のM31からおとめ座銀河団銀河の多くに付随するHII領域から放射される各輝線を捉えることができる。

*1 東京学芸大学 (184–8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

*2 川口市立科学館 (333–0844 川口市上青木 3-12-18)

本研究によって、1) KWFC各CCDチップ上下間の線形性の差は最大でも2.5-2.7%程度、2) 恒星のSDSS測光値を用いた等級のゼロ点決定の精度は、N5013、N6750撮像観測では、分光測光標準星を用いた場合と0.1等級以内、N4873撮像観測では0.2等級以内、3) 限界輝度は、N4873撮像で約24.5等級/□" (積分時間70分)、N5013およびN6750撮像で、それぞれ、25-26等級/□" (積分時間60分)と約23.5等級/□" (積分時間約20分)、が分った。

1. はじめに

恒星は一般に、低温かつ高密度な星間物質が大量に集積した星形成領域で誕生する。その際、大質量星から中小質量星までがほぼ同時に形成され、特に高い表面温度を持つ大質量星からの紫外線は、その周辺部の星間物質を電離する。このような電離ガス領域はHII領域と呼ばれる。HII領域に存在する電離ガスからは、電子温度、電子密度、金属量、電離光子の分光的エネルギー分布 (spectral energy distribution = SED) などに応じた相対強度で様々な輝線が放射される。そのため、HII領域のスペクトルから様々な輝線強度を調べることで、我々はそのHII領域を形成する電離ガスの物理特性を推測することができ、このようなスペクトルを多く集めることで、星形成の物理条件を明らかにすることができる。その一方で、渦巻銀河中には、その渦状腕を主に無数のHII領域が分布しており、これら一つ一つのスペクトルを分光観測から得ることは事実上不可能である。

また、Ferguson等は幾つかの渦巻銀河に対して、星間物質の密度が極めて低く、かつ、低金属量である銀河円盤の外縁部に多くのHII領域を発見している (Ferguson et al. 1998)。このようなHII領域の存在は、星形成の物理条件を低密度・低金属量環境という新しい観点から考える機会を与えるものと思われる。しかしながら、このようなHII領域のサンプルを様々な渦巻銀河に対して収集するためには、その銀河を中心とした広い天域の輝線源探索をしなければならない。このためには、HII領域を空間的に分解できるような近傍の渦巻銀河とそれを含めた周辺天域を撮像観測できる広い視野、そして、複数の輝線に対応した狭帯域フィルターを有した観測装置が必要となる。

そこで我々は、近傍の渦巻銀河とその外縁部に分布するHII領域の複数の輝線成分を得るために、広視野の多色狭帯域撮像観測を進めている。本研究では、広視野観測装置として東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曽観測所 (以下、木曽観測所) の105cmシュミット望遠鏡 (以下、木曽シュミット望遠鏡) と木曽広視野CCDカメラ (以下、KWFC = Kiso Wide-Field Camera) を使用した。木曽シュミット望遠鏡は、主鏡の直径が150cm、補正板の直径が

105cm (すなわち、有効口径105cm) で、F3.1の光学系を持つ主にサーベイ観測に威力を発揮する望遠鏡である。KWFCは、木曽観測所において木曽シュミット望遠鏡用に開発された可視光CCDカメラであり、4k×2kフォーマットのCCDチップ8枚 (MIT製CCDチップ4枚およびSiTe製CCDチップ4枚) によって、木曽シュミット望遠鏡搭載時には、約2.2°四方 (ピクセル分解能0.95"/pixel) という広い天域を一度で撮像することが可能である。この観測視野は、近傍銀河とその周辺天域を同時に撮像観測するために十分な広さであるだけでなく、世界でも屈指の広視野撮像装置である (酒向 2011; Sako et al. 2012)。図1にKWFCのCCDチップ配置の概念図を掲げた。なお、KWFCの8枚のCCDチップは、それぞれ、chip#0～#3 (MIT製)、chip#4～#7 (SiTe製) と呼ばれている。

HII領域から放射される主な輝線成分は、電離水素由来のH α 6563輝線 (以下、H α 輝線) とH β 4861輝線 (以下、H β 輝線)、電離酸素由来の[OIII] λ 4959, 5007輝線 (以下、[OIII]輝線)、電離窒素由来の[NII] λ 6548, 6583輝線 (以下、[NII]輝線)、そして、電離硫

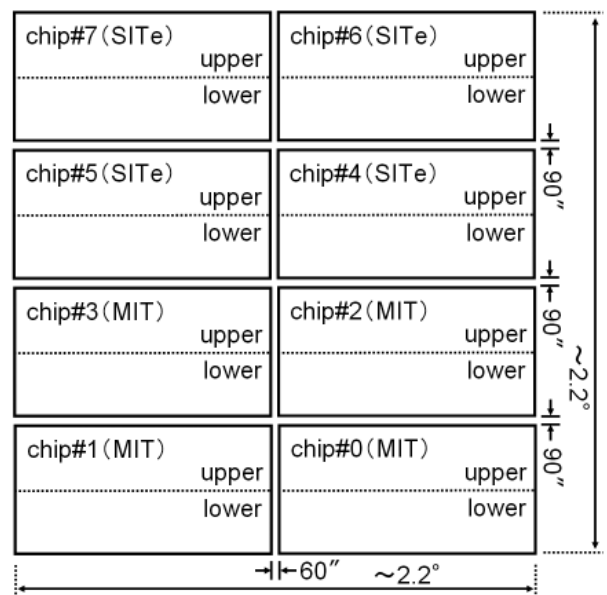


図1 KWFCの各CCDチップ配置の概念図。本稿では便宜上、出力ポートの違いによる各CCDチップの上 (北) 半分の領域をupper領域、下 (南) 半分の領域をlower領域と呼び、各CCDチップ中央の水平の点線でその境界を示した。

黄由来の[SII] $\lambda\lambda 6716, 6731$ 輝線(以下, [SII] 輝線)である(例えば, Böker et al. 2001)。我々は以前, 一般的に輝線強度が最も強いH α 輝線(実際には, H α 輝線の短波長側と長波長側に接して現れる二つの[NII] 輝線も含む)に対応したKWFC用狭帯域フィルター N6590を仕様設計・作成し, 主に観測データに基づいてその基本的な性質を評価した(西浦ほか2014)。ただし, 西浦ほか(2014)では, 諸隈(2013)の中で峰崎が指摘したような, 出力ポートの違いによる, KWFCの各CCDチップの上下(図1中のupper領域とlower領域)間に生じる線形性の差異については考慮されていない。我々はその後, H α 輝線に次いで強度が強い電離酸素由来の[OIII] 輝線と, H α 輝線と同じく電離水素由来のH β 輝線に対応した狭帯域フィルターを, そして, 木曾観測所は電離硫黄由来の[SII] 輝線に対応した狭帯域フィルターを作成した。これによって, HII領域から可視光域で放射される主な輝線の全てに対して, 木曾シュミット望遠鏡とKWFCによる狭帯域撮像が可能となった。

本稿では, これら狭帯域フィルターの仕様を整理し, 狭帯域撮像データを解析する上で基本的な情報となる, KWFCの各チップ上下間の線形性の差異の影響, 等級較正の精度, 限界輝度を測定し報告する。

2. 狭帯域フィルター N4873, N5013, N6750

2. 1 基本仕様

H β 輝線, [OIII] 輝線, [SII] 輝線に対応した狭帯域フィルター N4873, N5013, N6750について, 以下のようにそれぞれ仕様設計した。なお, 二つの[OIII] 輝線と二つの[SII] 輝線は, それぞれを狭帯域撮像で分離することが難しいために, 二つの輝線強度を合わせて

取り扱う。

静止系において波長 λ_0 に現れる輝線は, その輝線源の運動によるドップラー効果によって λ_0 とは異なる波長で観測される。HII領域について, そのガスの内部運動を V_{inn} , そのHII領域が存在する渦巻銀河の回転速度と後退速度をそれぞれ V_{rot} と V_{rad} とすると, これらによる波長遷移 $\Delta\lambda$ の最大値 $\Delta\lambda_{\text{max}}$ と最小値 $\Delta\lambda_{\text{min}}$ は, 西浦ほか(2014)で示したように, 光速 c を用いて, それぞれ,

$$\Delta\lambda_{\text{max}} = (V_{\text{inn}} + V_{\text{rot}} + V_{\text{rad}}) \lambda_0 / c \quad (\text{式1})$$

$$\Delta\lambda_{\text{min}} = (-V_{\text{inn}} - V_{\text{rot}} + V_{\text{rad}}) \lambda_0 / c \quad (\text{式2})$$

となる。これは, 狭帯域撮像観測によって上記のような運動状態にある輝線源から放射される静止波長 λ_0 の輝線を捉えるためには, 狭帯域フィルターの帯域を $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{min}}$ から $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{max}}$ とすればよいことを示している。なお, 本稿におけるフィルターの帯域とは, 透過率が最大値の50%以上となる波長帯を意味するものとする。

次に, HII領域を形成する電離ガスの速度分散から V_{inn} の最大値として 30 km s^{-1} (例えば, Smith & Weedman 1970, 1972), このHII領域が存在する渦巻銀河の回転速度 V_{rot} の最大値として 350 km s^{-1} (例えば, Rubin et al. 1985; Sofue & Rubin 2001), この渦巻銀河の後退速度 V_{rad} として, M31の -300 km s^{-1} を最小値(de Vaucouleurs et al. 1991: 以下, RC3), そして, 多くのおとめ座銀河団渦巻銀河を含む 3000 km s^{-1} を最大値(Tully 1988: 以下, T88)に, それぞれ採用した。図2に, 本研究で対象とするHII領域から放射される輝線の概念図を掲げた。

これらの条件の下で各輝線成分を帯域に含むように, 対応する各狭帯域フィルターの仕様を設計した。三つの狭帯域フィルター N4873, N5013, N6750はいず

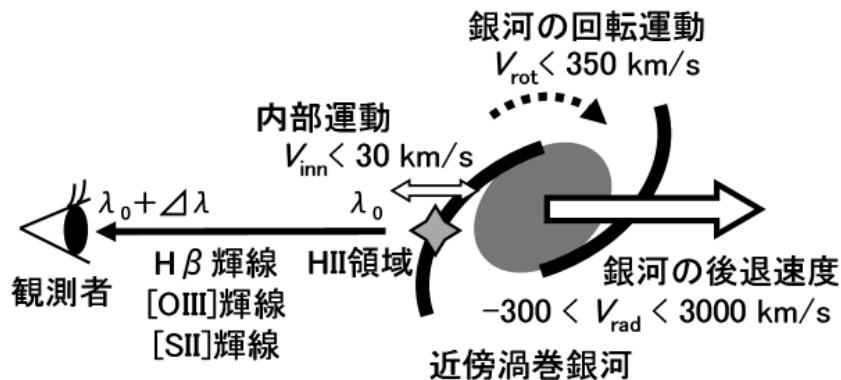


図2 近傍銀河に付随したHII領域から放射される輝線の概念図。

れも朝日分光(株)製であり、表1と図3a, 3bにこれらの透過率曲線を、表2に基本仕様を示した。なお、表1の透過率曲線は、平行光による実測値に対して単純な波長シフトを施し、F3.1相当としたものである。波長シフトは、N4873で -0.86 nm 、N5013で -0.91 nm 、

N6750で -1.35 nm である。また図3aと3bには、参考までに、KWFCに用意された広帯域 B, V, Rc, Ic フィルター (Bessell 1990) とSDSS- g, r, i フィルター (Doi et al. 2010) の透過率曲線も示した。

表1 狭帯域フィルターの透過率曲線

N4873		N5013		N6750	
λ (nm)	$T(\lambda)$ (%)	λ (nm)	$T(\lambda)$ (%)	λ (nm)	$T(\lambda)$ (%)
474	0.00	483	0.00	657	0.00
476	0.01	485	0.01	659	0.01
478	0.03	488	0.03	662	0.03
479	0.06	489	0.06	664	0.07
480	0.12	491	0.18	666	0.19
481	0.27	492	0.32	667	0.31
482	0.54	493	0.53	668	0.47
483	0.83	494	0.74	669	0.64
484	0.97	495	0.91	670	0.78
485	0.99	496	0.98	671	0.88
486	0.99	497	0.99	672	0.93
487	1.00	499	0.99	673	0.97
488	1.00	500	1.00	674	0.99
489	1.00	501	1.00	675	1.00
490	0.99	502	1.00	676	0.99
491	0.93	503	0.99	677	0.98
492	0.72	506	0.99	678	0.94
493	0.42	507	0.95	679	0.90
494	0.21	508	0.83	680	0.81
495	0.10	509	0.63	681	0.68
496	0.05	510	0.43	682	0.50
497	0.03	511	0.26	683	0.33
499	0.01	512	0.16	685	0.12
501	0.00	513	0.09	687	0.04
		515	0.04	689	0.02
		519	0.01	691	0.01
		522	0.00	693	0.00

注) 透過率 $T(\lambda)$ は表2中の各最大透過率で規格化した。

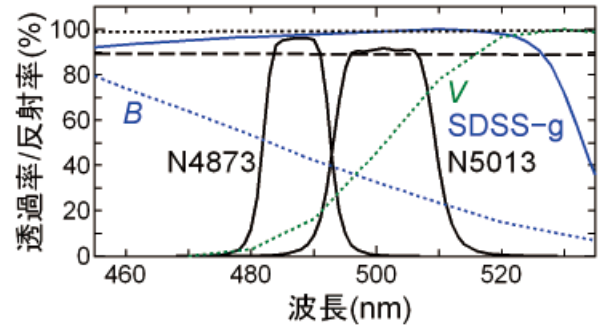


図3a 狭帯域フィルター N4873 (黒実線) と N5013 (黒実線)、広帯域フィルター SDSS- g (青実線)、 B (青点線)、 V (緑点線) の透過率曲線、木曾シュミット望遠鏡の補正板の透過率曲線 (黒点線) と主鏡の反射率曲線 (黒破線)。縦軸は透過率 (%) または反射率 (%) を、横軸は波長 (nm) を示す。

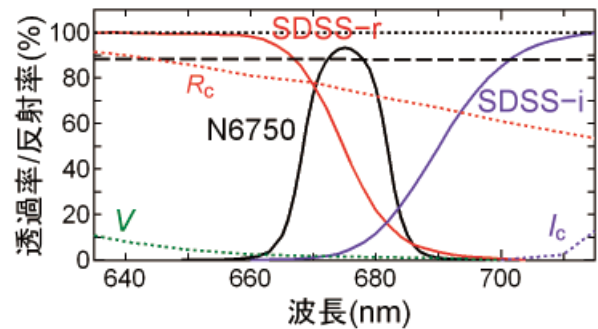


図3b 狭帯域フィルター N6750 (黒実線)、広帯域フィルター SDSS- r (赤実線)、SDSS- i (紫実線)、 V (緑点線)、 Rc (赤点線)、 Ic (紫点線) の透過率曲線、黒点線と黒破線と縦軸・横軸は図3aに同じ。

表2 狭帯域フィルターの基本仕様

フィルター名	N4873	N5013	N6750
中心波長 ^{注1)}	487nm	501nm	675nm
ピーク波長 ^{注2)}	488nm	501nm	675nm
バンド幅 ^{注3)}	10.9nm	16.8nm	13.9nm
帯域 ^{注4)}	481.8–492.7nm	492.9–509.7nm	668.1–682.0nm
最大透過率	96.2%	91.6%	93.3%

注1) 帯域の中心となる波長

注2) 透過率が最大となる波長

注3) 半値幅

注4) 相対的な透過率が50%以上となる波長帯

2. 2 木曾シュミット望遠鏡およびKWFCの波長依存性

木曾シュミット望遠鏡では、鏡筒先端から入射した天体の光は、補正板を経て主鏡で反射され、主焦点に集光される。主焦点にはKWFCが設置され、フィルターを通った光はKWFCのデュワー窓からKWFC内部に入り、CCD上に結像される。従って、地球大気による減光の効果を考慮しなければ、観測で得られる天体からの光は、天体のスペクトルに補正板の透過率、主鏡の反射率、フィルターの透過率、KWFCのデュワー窓の透過率、CCDチップの感度特性をコンボリューションしたものとなる。この時、フィルターの帯域中で、これら透過率や反射率、感度特性に大きな変動があると、出力された天体画像に標準的な画像処理では補正しきれないパターンが現れることがある(例えば、酒向 2012; 諸隈・松永 2012 など)。

狭帯域フィルターの透過率と共に、図 3a, 3b に木曾

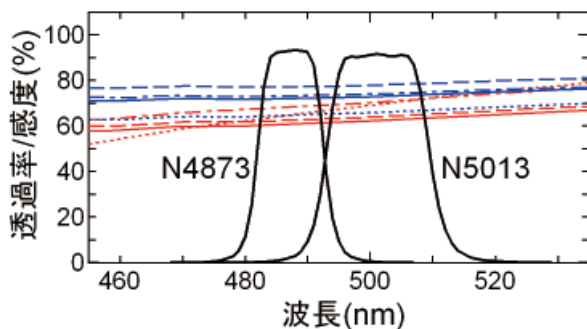


図 4a 狭帯域フィルター N4873 と N5013 の透過率曲線 (黒実線) と KWFC の各 CCD チップの感度特性。縦軸に透過率 (%) または感度 (%), 横軸に波長 (nm) を示した。赤実線は chip#0, 赤点線は chip#1, 赤破線は chip#2, 赤一点破線は chip#3 の感度特性, 青実線は chip#4, 青点線は chip#5, 青破線は chip#6, 青一点破線は chip#7 の感度特性である。

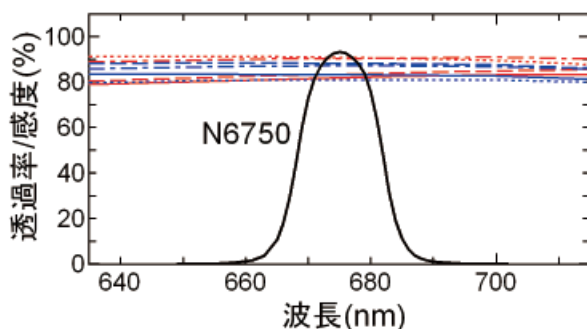


図 4b 狭帯域フィルター N6750 の透過率曲線 (黒実線) と KWFC の各 CCD チップの感度特性。各感度特性と縦軸・横軸は図 4a に同じ。

シュミット望遠鏡の補正板の透過率と主鏡の反射率, 図 4a, 4b に KWFC の 8 つの CCD チップの感度特性を示した。木曾シュミット望遠鏡の補正板の透過率と主鏡の反射率のデータは樽沢ほか (1996) から, KWFC の各 CCD チップの感度特性のデータは諸隈 (2013) から, それぞれ図をスキャンして数値データを読み込むことで得た。なお, CCD チップの感度特性にはデュワー窓の透過率が含まれている。図 2a, 2b, 3a, 3b から, N4873, N5013, N6750 のいずれの帯域中においても, 光学系や各 CCD チップの感度特性に大きな変動などは見られない。

3. 各 CCD チップ上下間の線形性の差異

諸隈 (2013) の中で峰崎が指摘した各 CCD 上下 (南北) 間の線形性の差異は, 画像上下間の段差として現れる。峰崎は, 一般的な画像解析の手法を施すだけでは 1% 程度の段差が残ること, そして, chip#3 の *V* バンド画像については, CCD の上下間の応答に相対的な非線形性を仮定することで, この段差を 0.1-0.2% 程度まで軽減できることを示した。西浦 (2014) は, *V*, SDSS-*i*, N6590, N5013 フィルターに対して, この非線形的な応答性の差異が, 最大でも chip#0, #1, #2, #3 で約 0.5%, 約 1.5%, 約 1-2%, 約 2% であり, chip#4, #5, #6, #7 で約 0.5-1.5%, 約 0.5%, 約 0.5%, 約 0.5% であることを報告した。この最大でも約 2% という差を無視できるのであれば, KWFC の観測データに対する最適な画像解析手順は, まず各 CCD 画像を全て上下に分割し, これらについて一般的な画像解析を施し, 背景光を除去したのちに再度上下画像を結合することである。

この画像解析手法の妥当性を検証するため, 我々は 2014 年 3 月 26 日から 2018 年 1 月 31 日の間の 5 日で, 狭帯域 N4873, N5013, N6590, N6750 フィルターと広帯域フィルター *B*, *V*, *Rc*, SDSS-*i* フィルターを用い, 露光時間と N.D. フィルターを変えることで様々な照度に対するドーム・フラット画像を 3 枚ずつ取得した。表 3 にドーム・フラット観測の詳細を掲げた。

ドーム・フラットの画像解析にはアメリカの国立光学天文台 (National Optical Astronomy Observatory = NOAO) が開発・無償配布する Image Reduction and Analysis Facility (以下, IRAF) を用いた。まず, KWFC の各 CCD チップの画像を上下 (南北), つまり upper 領域と lower 領域に分割し, それぞれから, オーバー・スキャン領域 (overscan region: 以下, OSR) によるレベル補正を施したバイアス画像を差し引いた。そし

て、各CCDチップについて上半分の領域 (upper 領域) の応答の平均値 I_{upp} と下半分の領域 (lower 領域) の応答の平均値 I_{low} を測定した。各CCDチップ上下間の線形性の差異は、 $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ の照度に対する依存性という形で現れる。 B , V , N4873, N5013 フィルターによる MIT 製 chip#0-#3 の照度 I_{low} に対する $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ を図 5a に、SITe 製 chip#4-#7 のケースを図 5b に掲げた。また、 R_c , SDSS- i , N6590, N6750 フィルターによる chip#0-#3 のケースを図 6a, chip#4-#7 のケースを

図 6b に掲げた。

図 5a, 5b, 6a, 6b から、全体的な特徴として、 $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ の値は照度が増加するに伴い 5000-10000 ADU まで急激に立ち上がり、その後、非常に緩やかな増加傾向を経て、ほぼ一定となることがわかる。この一定の値は、チップやフィルターとは無関係に約 2.5-2.7% である。また、 $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ は、KWFC の広い照度範囲 (500-35,000 ADU) で、チップやフィルターとは無関係に 0.1% 以内となっている。これは、一つの CCD 画像を

表3 ドーム・フラット観測の詳細

フィルター	取得日	露光時間 (秒)	N.D. フィルター
N4783	2018/01/30	1, 3, 4.5, 5*, 6, 9, 12, 14, 16, 19, 22, 24, 26	未使用 (*のみ 1.0)
N5013	2014/06/03	1, 2, 5, 5*, 8, 9, 11, 12, 15, 18, 22	未使用 (*のみ 1.0)
N6590	2014/06/03	2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	1.0
N6750	2018/01/30	1, 5, 6.5*, 10, 15, 20, 3, 40, 52	1.0 (*のみ未使用)
	2018/01/31	3, 8*, 60	1.0 (*のみ未使用)
B	2018/01/31	1*, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 44, 48, 52	1.0 (*のみ 1.8)
V	2014/03/26	5, 8, 10, 10*, 10**, 13, 15**,	1.0 (*は 1.8, **は 2.2)
	2018/01/31	1*, 5, 9, 12.5, 14, 16	1.0 (*のみ 1.8)
R_c	2018/01/30	1*, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 16.5, 18, 20	1.4 (*のみ 1.8)
SDSS- i	2014/06/04	2*, 2, 4, 6, 9, 12, 15, 17, 20, 22	1.0 (*のみ 1.8)

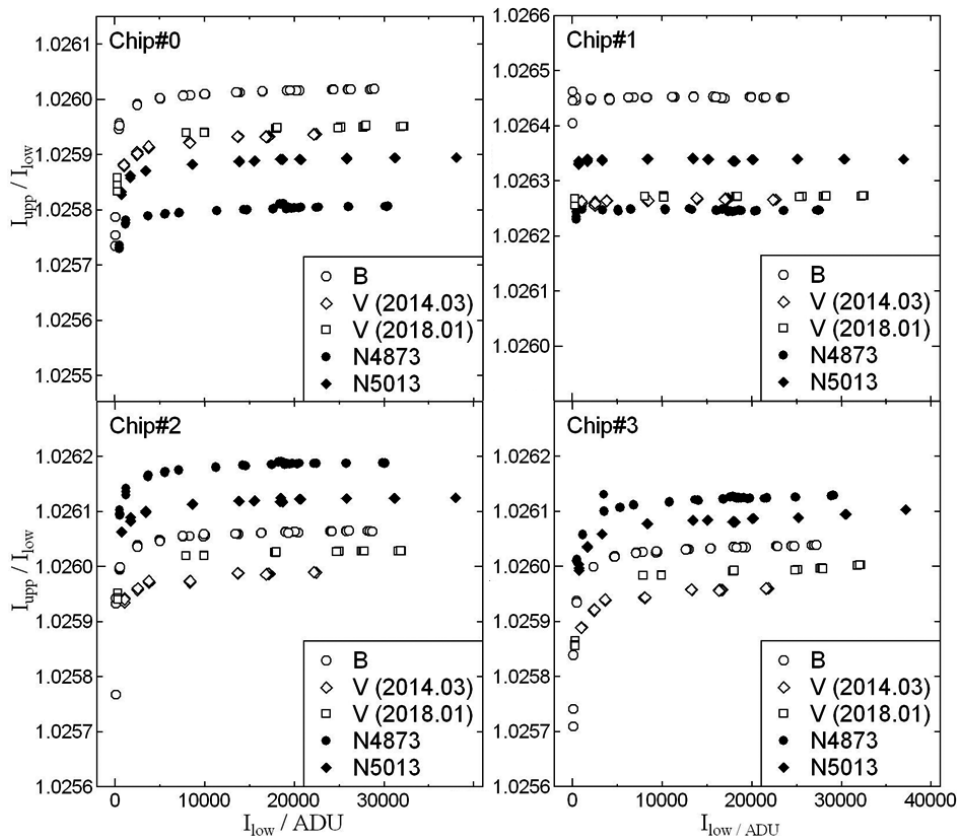


図 5a MIT 製 chip#0-#3 の、 B (\circ), V (\diamond または \square), N4873 (\bullet), N5013 (\blacklozenge) フィルターによる、照度 I_{low} に対する $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ 。縦軸は $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ 、横軸は I_{low} (ADU) を示す。

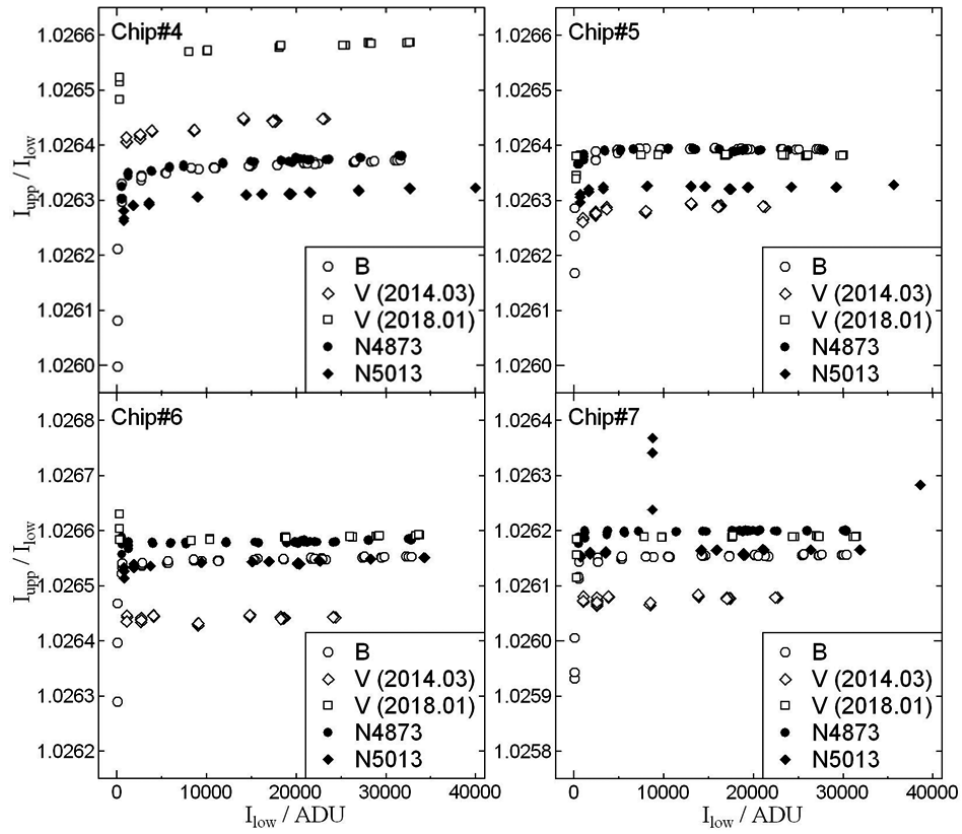


図5b SITE製chip#4-#7の, 照度 I_{low} に対する $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ 。印および縦軸・横軸は図5aに同じ。

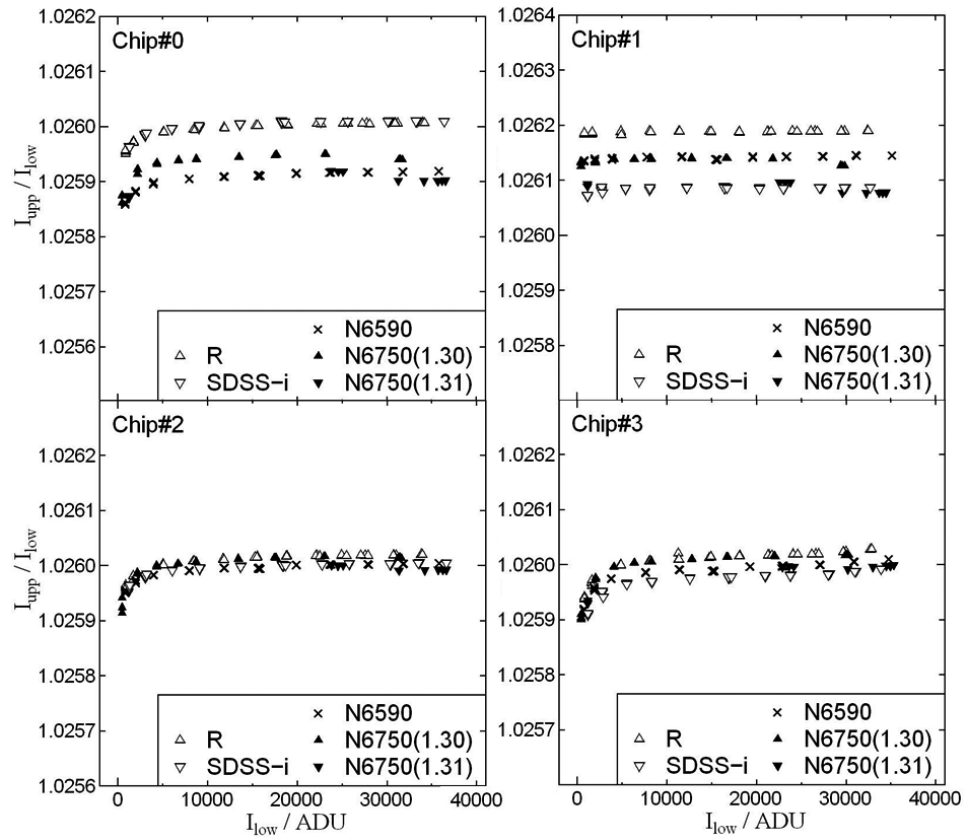


図6a MIT製chip#0-#3の, R_c (\triangle), $SDSS-i$ (∇), $N6590$ (\times), $N6750$ (\blacktriangle または \blacktriangledown) フィルターによる, 照度 I_{low} に対する $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ 。縦軸は $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$, 横軸は I_{low} (ADU) を示す。

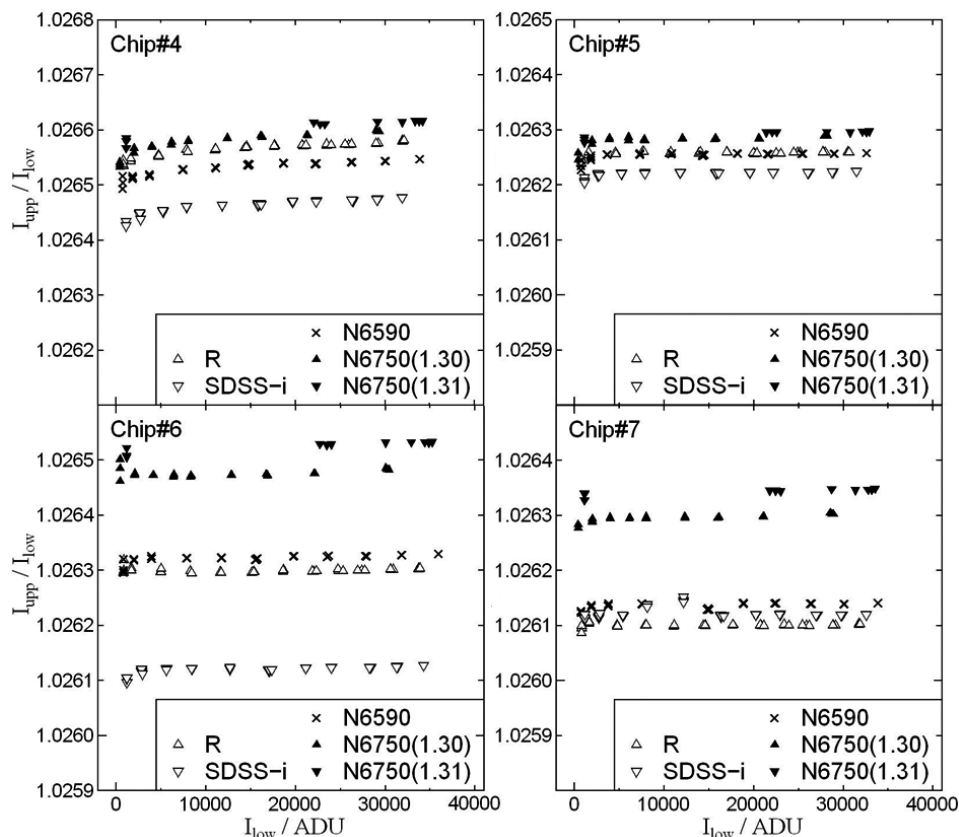


図6b SITE製chip#4-#7の、照度 I_{low} に対する $I_{\text{upp}}/I_{\text{low}}$ 印および縦軸・横軸は図6aに同じ。

上下に分割してから一般的な画像解析を施す、という手法によって、upper領域とlower領域の間の線形性の照度依存性を、照度にはほぼ依存しない一定値とできることを意味している。

さらに図5aと5bから、 V フィルターについて、ほぼ全てのチップで、2014年3月に取得したデータと、このほぼ4年後の2018年1月に取得したデータの間で0.01%以下の系統的な差が確認できる。一見、これは4年間での経年変化とも考えられるが、図6aと6bに示した1日違いで取得されたN6750フィルターのデータ間の系統的な差を考慮すると、毎回の観測条件の微細な違いによって、この程度の系統的な差が十分に生じ得ると考えるのが妥当であろう。

4. 等級較正

4. 1 方法

通常、狭帯域撮像観測では等級較正のために、SEDが既知である分光測光標準星の観測を行う。しかし、分光測光標準星は、必ずしも全天に多数分布している訳ではなく、また、1つの天域に1個しか用意されていないのが現状である(例えば、Massey et al. 1988)。こ

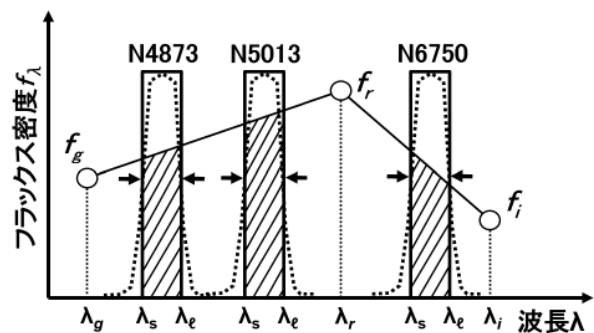


図7 等級較正の概念図。点線はそれぞれ狭帯域フィルター N4873, N5013, N6750の透過率曲線、実線による矩形はこれらの近似的な透過率であり、各狭帯域フィルターと同じ帯域・FWHM・最大透過率を有する仮想的なフィルターを示す。白丸とこれらをつなぐ実線は、恒星のSDSSによる観測値とこれらに基づく近似的なSEDであり、 λ_g , λ_r , λ_i はSDSS- g , $-r$, $-i$ バンドの波長、 f_g , f_r , f_i はこれらのフラックス密度である。また矢印は各狭帯域フィルターのFWHM、 λ_s と λ_e は帯域の最短波長と最長波長を示す。また、斜線を施した台形部分は、仮想的な狭帯域フィルターを透過する恒星のフラックスを示す。

れに対して, KWFC は性質が少しずつ異なる 8 個の CCD チップで構成されており, 厳密な意味では, これら一つ一つによる分光測光標準星の撮像観測が必要となる。これは, 日本国内の気象条件の不安定さを考慮すれば, 著しい観測効率の低下を引き起こす。そこで, 西浦ほか (2014) では, 目標天体と同一視野内の複数の恒星の測光データを用いることで, N6590 狭帯域画像の等級較正を行った。これは, 目標天体周辺に存在する恒星の測光データを線形補間することで SED とし, これに狭帯域フィルターの透過率をコンボリューションすることで, 該当フィルターによる恒星の等級を算出, これを実際の観測画像から得られた器械等級と比較するというものであった。この際, 作業を簡便にするため, フィルターの透過率は同じ帯域を持つ矩形と仮定した。図 7 に, N4873, N5013, N6750 に対する, この手法による等級較正の概念図を示した。この方法では, ある恒星に対して, 広帯域 SDSS-*g* (波長 λ_g), SDSS-*r* (波長 λ_r), SDSS-*i* (波長 λ_i) 撮像によるフラックス密度を, それぞれ, f_g , f_r , f_i とすると, 狭帯域フィルター N4873, N5013, N6750 を透過する恒星からの光のフラックス F_{N4873} , F_{N5013} , F_{N6750} は,

$$F_{N4873} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(f_r - f_g)(\lambda_\ell + \lambda_s - 2\lambda_g)}{\lambda_r - \lambda_g} + 2f_g \right\} \quad (\text{式 3})$$

$$F_{N5013} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(f_r - f_g)(\lambda_\ell + \lambda_s - 2\lambda_g)}{\lambda_r - \lambda_g} + 2f_g \right\} \quad (\text{式 4})$$

$$F_{N6750} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(f_i - f_r)(\lambda_\ell + \lambda_s - 2\lambda_r)}{\lambda_i - \lambda_r} + 2f_r \right\} \quad (\text{式 5})$$

と表される。ここで λ_s と λ_ℓ は, 表 2 に示した狭帯域フィルターそれぞれの帯域の最短波長と最長波長である。

4. 2 精度の評価

我々は, 分光測光標準星の狭帯域撮像から得られる等級のゼロ点 ZERO (SP) と, その周辺に存在する恒星の SDSS による PSF (=point spread function) 測光値と狭帯域撮像から得られる等級のゼロ点 ZERO (PT) との比較から, 狭帯域 N4873, N5013, N6750 撮像データの等級較正方法の精度を評価する。

分光測光標準星について, 2017 年 5 月 5 日と 2018 年 1 月 26 日に PG 0934+554 の N4873 および N6750 撮像観測を, そして, 2014 年 11 月 19 日に BD+28° 4211 の N5013 撮像観測を行った。露光時間は, N4873, N5013, N6750 フィルターに対して, それぞれ, 180 秒, 20 秒, 210 秒とした。各撮像観測では, 分光測光標準星を chip#0 から #7 のそれぞれの視野内に入れて, チップ毎に露光を行った。表 4 に分光測光標準星の基本的なデータを, 表 5 に分光測光標準星の観測の詳細を示した。

分光測光標準星の画像解析は, IRAF を用いて, 本稿第 3 章で述べた手順に従って行った。また, IRAF / APPHOT を使って, 分光測光標準星およびこれとおなじチップ内の約 10 個の恒星の検出と開口測光を行った。これらの恒星は, 明るいものを優先しながらも, 基本的にはランダムに選出した。そして, CDS (=Centre de Données astronomiques de Strasbourg) が運

表 4 分光測光標準星の基本データ

名称	PG 0934+554	BD+28° 4211
赤経 (J2000.0) 注1)	09 ^h 38 ^m 19.9 ^s	21 ^h 51 ^m 11.1 ^s
赤緯 (J2000.0) 注1)	+55° 05' 53"	+28° 51' 52"
スペクトル型 注2)	sdO	sdOp
m _{N4873} (mag.) 注3)	11.961	10.339
m _{N5013} (mag.) 注3)	11.984	10.363
m _{N6750} (mag.) 注3)	12.519	10.949

注1) SIMBAD Astronomical Database – CDS (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>)

注2) Massey et al. (1988)

注3) This work

表 5 分光測光標準星観測の詳細

名称	観測日	フィルター	露光時間	Z.D.(°)	seeing
PG 0934+554	2017 年 5 月 05 日	N4873	180 秒	37.0–41.6	~ 2.5–3"
	2018 年 1 月 26 日	N6750	210 秒	33.3–28.6	~ 7.5–9"
BD+28° 4211	2014 年 11 月 19 日	N5013	20 秒	17.4–20.2	~ 2.5–3"

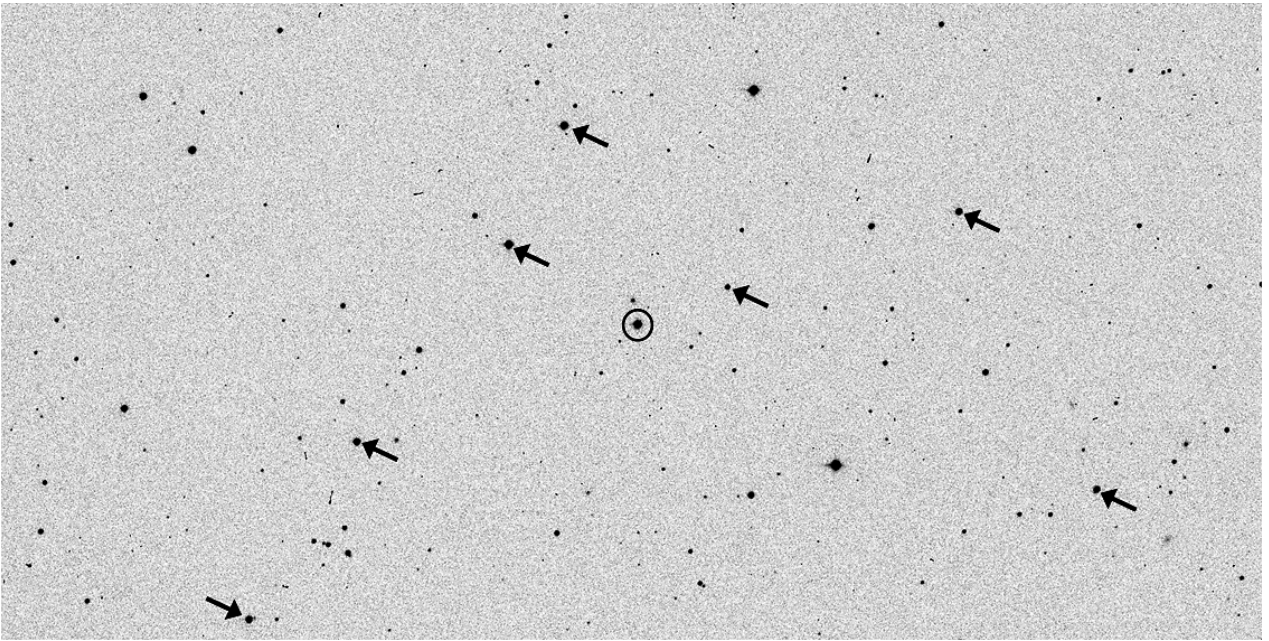


図8 分光測光標準星 PG 0934+554 の狭帯域 N4873 画像。丸印が PG 0934+554, 矢印が ZERO (PT) を導出する際に用いた恒星 (一部) である。KWFC の chip#3 による画像の一部を拡大したもの。視野は縦 15' × 横 30', 方向は上が北, 左が東である。

営する天体カタログ・データベース VizieR を用いて, SDSS (=Sloan Digital Sky Survey) - R12 (Alam et al. 2015) から, これらの恒星の SDSS-g, SDSS-r, SDSS-i の PSF 測光値を得た。最終的には, この PSF 測光値と式 (3) - (5) から, 分光測光標準星周辺の恒星に対する, 狭帯域フィルターによる AB 等級の値, AB_{N4873} , AB_{N5013} , AB_{N6750} をそれぞれ算出し, 開口測光の値と比較することで ZERO (PT) を求めた。さらに, Massey et al. (1988) による PG0934+554 と BD+28° 4211 の SED に, 表 1 の各狭帯域フィルターの透過率曲線をコンボリューションすることで, これらの AB_{N4873} , AB_{N5013} , AB_{N6750} を算出した。算出した AB 等級の値は表 4 に示した。この値と開口測光で得た値から, ZERO (SP) を求めた。図 8 に一例として, PG 0934+554 の N4873 画像 (chip#3 による) を示し, 表 6 に各狭帯域フィルターによる各チップに対する ZERO (SP) と ZERO (PT) の差 $\Delta ZERO = ZERO (SP) - ZERO (PT)$ を掲げた。誤差は ZERO (PT) 導出に伴うランダム誤差である。

表 6 から, ZERO (PT) に伴うランダム誤差の大きさを考慮すると, N5013 と N6750 については KWFC のチップに依らず, ZERO (SP) と ZERO (PT) はほぼ一致している。一方, N4873 では $\Delta ZERO$ の絶対値が 0.1 等から 0.2 等近くにもなり (0.1 等差はフラックスで 9-10%, 0.2 等差では 15-20% に相当する), 系統的に ZERO (PT) の方が, ZERO (SP) よりも大きくなる傾向がある。これは, サンプルとした分光測光標準星の個

表 6 等級のゼロ点の差

chip	$\Delta ZERO$ (mag.)		
	N4873	N5013	N6750
#0	-0.115 ± 0.072	-0.007 ± 0.022	$+0.040 \pm 0.039$
#1	-0.142 ± 0.085	-0.057 ± 0.032	$+0.053 \pm 0.039$
#2	-0.131 ± 0.069	-0.020 ± 0.019	$+0.035 \pm 0.039$
#3	-0.102 ± 0.090	$+0.012 \pm 0.034$	-0.019 ± 0.051
#4	-0.159 ± 0.068	$+0.019 \pm 0.012$	$+0.051 \pm 0.010$
#5	-0.155 ± 0.082	-0.020 ± 0.025	-0.010 ± 0.055
#6	-0.120 ± 0.060	-0.006 ± 0.016	$+0.065 \pm 0.039$
#7	-0.145 ± 0.080	-0.036 ± 0.026	$+0.073 \pm 0.043$

性に起因する可能性があり, 今後, より詳細な分析が必要である。

5. 各狭帯域撮像の限界輝度

近傍渦巻銀河 M101 の狭帯域撮像観測を行い, 画像処理・等級較正の後, チップ毎の限界輝度を見積もった。M101 の基本的な性質は, 西浦ほか (2014) の表 3 を参照して欲しい。観測から, 2014 年 3 月 27 日に N5013 画像を露光時間 300 秒で 12 枚, 2018 年 1 月 26 日に N6750 画像を露光時間 420 秒で 4 枚, 同年 1 月 27 日に N4873 画像を露光時間 420 秒で 10 枚得た。M101 の狭帯域撮像観測の詳細は表 7 に示した。画像解析には IRAF を使用し, 本稿 3 章で述べた手法によって行った。そして, 背景光除去の後, 必要に応じてフ

表7 M101の狭帯域撮像観測の詳細

観測日	フィルター	露光時間×枚数	Z.D.(°)	seeing
2014年3月27日	N5013	300秒×12枚	19.1-25.9	~ 4.5-5"
2018年1月26日	N6750	420秒×3枚	43.3-27.3	~ 9.5"
2018年1月27日	N4873	420秒×10枚	45.5-33.1	~ 9-10"

ラックス・レベルの調整を行い、フィルター毎 CCD チップ毎に画像を合成した。図9に一例として、M101天域のN4873画像を掲げた。等級較正は、M101周辺天域の恒星のSDSSのPSF測光値を使い、前節で述べた方法で行った。そして、各 CCD チップ画像の限界輝度として、背景光ゆらぎの 1σ に相当する輝度を、IRAF/imexamを用いて測定した。表8に算出した各狭帯域撮像・各 CCD チップの限界輝度を示した。

表8 各狭帯域撮像の限界輝度

Chip	限界輝度 (mag/□") ^{注)}		
	N4873	N5013	N6750
#0	24.63 ± 0.01	25.70 ± 0.01	23.66 ± 0.07
#1	24.64 ± 0.02	25.72 ± 0.06	23.72 ± 0.04
#2	24.66 ± 0.06	25.45 ± 0.02	23.56 ± 0.04
#3	24.61 ± 0.02	25.41 ± 0.06	23.59 ± 0.02
#4	24.40 ± 0.02	24.99 ± 0.02	23.06 ± 0.02
#5	24.35 ± 0.02	25.02 ± 0.05	23.26 ± 0.06
#6	24.37 ± 0.02	25.05 ± 0.02	23.19 ± 0.03
#7	24.31 ± 0.01	25.00 ± 0.01	23.15 ± 0.02

注) 積分時間は、N4873が70分、N5013が60分、N6750が約20分。

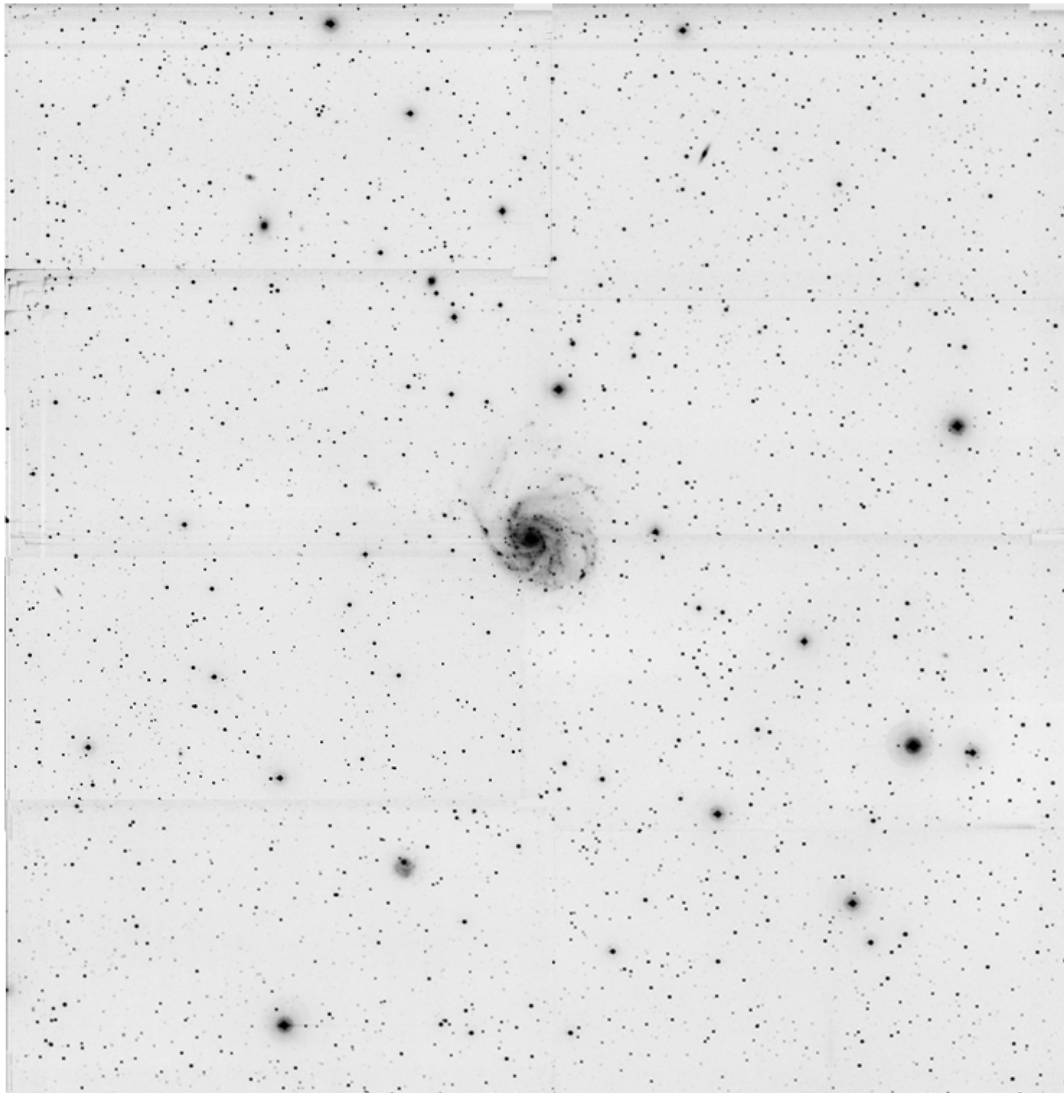


図9 M101天域の狭帯域N4873撮像画像。視野は約 $2^\circ \times 2^\circ$ 、方角は上が北、左が東である。

6. まとめ

可視光波長域で極めて広い観測視野を持つ、木曾シュミット望遠鏡とKWFC用の狭帯域フィルターN4873, N5013, N6750について、その波長特性、等級較正方法、限界輝度を調査した。

- 1) 狭帯域フィルターN4873, N5013, N6750は、それぞれ、 $H\beta$ 輝線、 $[OIII] \lambda\lambda 4959, 5007$ 輝線、 $[SII] \lambda\lambda 6716, 6731$ 輝線に対応しており、これらの帯域は、その輝線源の内部運動が最大で 30 km s^{-1} 、これが存在する銀河の回転速度が最大で 350 km s^{-1} 、この銀河の後退速度が $-300\text{--}3000 \text{ km s}^{-1}$ の範囲にあるものまで捉えることが可能である。
- 2) 各狭帯域フィルターの帯域中では、KWFCの各CCDチップの感度特性などに急激な変化は見られなかった。これから、これらを用いた狭帯域撮像画像には、光学系やCCDチップに起因する独特なパターンなどが現れない、もしくは現れても無視できる程度であることが確認できた。
- 3) KWFCのCCDチップの上下の線形性の差は、画像解析を行う前に、1枚のCCD画像を予め上下(南北)に分割し、それぞれに対して、OSRを考慮したバイアス除去、感度むら補正(フラット・フィールドイング)、を行うことで、使用したフィルターやチップに依らず、最大でも2.5–2.7%程度に抑えられることが判明した。この線形性の違いによって生じる画像中の段差は、フラット・フィールドイング後に、通常背景光除去を行って再統合することで、ほぼ解消される。
- 4) 狭帯域N5013とN6750撮像データの等級較正については、観測データから得た器械等級の値と、その画像中に写った恒星のSDSSによるPSF測光値と単純化したフィルターの透過率曲線から計算される等級の値を比較することで、0.1等級以内の精度で分光測光標準星を用いた場合と同じ結果が得られることが確認できた。また、N4873撮像データについては、分光測光標準星を用いた場合よりも、チップに依らず系統的に0.1–0.2等級ほど暗い値が得られることが分かった。
- 5) 各狭帯域撮像観測に対して、CCDチップ毎の限界輝度を表8のように算出した。

これらN4873, N5013, N6750フィルターとN6590フィルター(西浦ほか2014)を用いることで、広視野多色狭帯域撮像観測が可能である。このような観測データからは、銀河とその周辺天域に存在するHII領域の探

索とその物理状態や化学的性質を議論できる。また、天球上で大きく広がる銀河系内星雲に対しては、電離ガスの詳細な分布や構造を知ることができる。特にHII領域や惑星状星雲で、比較的簡単な構造を持つもの(例えば、ばら星雲やらせん状星雲NGC7293など)は、天体の性質と原子構造・イオンに関連させた理科教育・科学教育のテーマとして発展させることも可能であろう。

本研究を遂行するにあたって、東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター長の土居守氏、同センター木曾観測所所長の小林尚人氏、同観測所副所長の青木勉氏、同観測所の諸隈智貴氏、酒向重行氏、三戸洋之氏、征矢野隆夫氏、樽沢賢一氏、森由貴氏、国立天文台光赤外研究部の八木雅文氏、三重大学教育学部の伊藤信成氏、和歌山大学の富田晃彦氏、朝日分光(株)の木村俊彦氏には、各狭帯域フィルターの仕様決定や観測によるデータ取得、画像解析の手法、そして、各データの評価方法などに関して、多大な協力や助言を頂きました、深く感謝し、心より御礼申し上げます。また、本稿の執筆・出版に関して、学術振興会による科学研究費補助金(24654046, 16K12750:代表者 西浦慎悟, 17K00971:代表者 伊藤信成)の支援を受けました、心から感謝いたします。

参考文献

- Alam, S., and 303 coauthors. (2015), “The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 219, article id. 12, 27pp.
- Bessell, M. S. (1990), “*UBVR* pass bands”, *Publications of the Astronomical Society of Pacific*, 102, pp. 1181–1199.
- Böker, T., van der Marel, R. P., Mazzuca, L., Rix, H.-W., Rudnick, G., Ho, L. C., and Shields, J. C. (2001), “A Young Stellar Cluster in the Nucleus of NGC 4449”, *The Astronomical Journal*, 121, pp. 1473–1481.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., Jr., Buta, R. J., Paturel, G., and Fouque, P. (1991), “Third Reference Catalogue of Bright Galaxies”, Springer, New York., 2091p. (RC3)
- Doi, M., Tanaka, M., Fukugita, M., Gunn, J. E., Yasuda, N., Ivezić, Ž., Brinkmann, J., de Haars, E., Kleinman, S. J., Krzesinski, J., and French L. R. (2010), “Photometric Response Functions of the Sloan Digital Sky Survey Imager”, *The Astronomical Journal*, 139, pp. 1628–1648.
- Ferguson, A. M. N., Wyse, R. F. G., Gallagher, J. S., and Hunter, D. A.

- (1998), “Discovery of Recent Star Formation in the Extreme Outer Regions of Disk Galaxies”, *Astrophysical Journal*, 506, pp. L19-L22.
- Massey, P., Strobel, K., Barnes, J. V., and Anderson, E. (1988), “Spectrophotometric Standards”, *Astrophysical Journal*, 328, pp. 315-333.
- 諸隈智貴・松永典之 (2012), “KWFC データ解析パイプライン開発の進捗状況”, 木曾シュミットシンポジウム2013. (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2012/Morokuma1.pdf>)
- 諸隈智貴 (2013), “解析マニュアルの整備”, 木曾シュミットシンポジウム2013. (http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2013/kisosymp2013_morokuma1.pdf)
- 西浦慎悟 (2014), “KWFC用狭帯域フィルター～H α および[OIII]～”, 木曾シュミットシンポジウム2014.
- 西浦慎悟・根本明宗・宮野彩 (2014), “木曾105cm シュミット望遠鏡と木曾広視野 CCD カメラ KWFC による広視野 659nm 帯撮像観測”, 東京学芸大学紀要 自然科学系, 第66集, pp. 53-60.
- Rubin, V. C., Burstein, D., Ford, W. K., Jr., and Thonnard, N. (1985), “Rotation velocities of 16 SA galaxies and a comparison of Sa, Sb, and Sc rotation properties”, *Astrophysical Journal*, 289, pp. 81-98, 101-104.
- 酒向重行 (2011), “世界最大級の広視野カメラ KWFC について”, 木曾シュミットシンポジウム2011. (http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2011/KisoSymp2011/KisoSymp2011_Sako.pdf)
- 酒向重行 (2012), “KWFCの開発・運用”, 木曾シュミットシンポジウム2012. (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2012/Sako.pdf>)
- Sako, S., Aoki, T., Doi, M., Ienaka, N., Kobayashi, N., Matsunaga, N., Mito, H., Miyata, T., Morokuma, T., Nakada, Y., Soyano, T., Tarusawa, K., Miyazaki, S., Nakata, F., Okada, N., Sarugaku, Y., and Richmond, M. W. (2012), “KWFC: four square degrees camera for the Kiso Schmidt Telescope”, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Proceedings of the SPIE*, 8446, article id. 84466L, 11pp.
- Smith, M. G., and Weedman, D. W. (1970), “Internal Motions in Galactic and Extragalactic HII Regions”, *Astrophysical Journal*, 161, pp. 33-40.
- Smith, M. G., and Weedman, D. W. (1972), “Internal Kinematics of the 30 Doradus Nebula in the Large Magellanic Cloud”, *Astrophysical Journal*, 172, pp. 307-317.
- Sofue, Y., and Rubin, V. (2001), “Rotation Curves of Spiral Galaxies”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 39, pp. 137-174.
- 樽沢賢一・征矢野隆夫・青木 勉・吉田重臣・長谷川隆 (1996), “2KCCDの開発 II. デュワー関係”, 木曾シュミット観測の新展開 2KCCDとKONICによる新しい天文学集録, 東京大学理学部天文学教育研究センター木曾観測所, pp. 7-16.
- Tully, R. B. (1988), *Nearby galaxies catalog*, Cambridge University Press, Cambridge and New York., 221p. (T88)