

中低分散ロングスリット分光器 (MALLS) の再性能評価 I : 効率と波長分解能

新井 彰、高木 悠平、本田 敏志、坂元 誠、鳴沢 真也、伊藤 洋一

兵庫県立大学 天文科学センター 西はりま天文台

Performance Reevaluation of Medium- and Low-dispersion Long-slit Spectrograph (MALLS) I : Throughputs and Wavelength Resolutions

Akira ARAI, Yuhei TAKAGI, Satoshi HONDA, Makoto SAKAMOTO, Shinya NARUSAWA
and Yoichi ITOH

*Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, Sayo-cho, Hyogo
679-5313*

E-mail: arai@nhao.jp

Abstract

我々は 2m なゆた望遠鏡に設置されている中・低分散ロングスリット分光器 (MALLS) のメンテナンスを行い、2012 年に一部機能についての性能評価を実施したので報告する。今回の性能評価では低分散モードの効率測定と、中・低分散モードでの波長分解能を測定した。効率は最大で約 19% であった。これは設計値の約 2/3 の値であることを確認した。また、各三つの観測モードの波長分解能は概ね設計どおりの性能が出ていることを確かめた。

Abstract

We report on our partly reevaluations of Medium- and Low-dispersion Long-slit Spectrograph (MALLS) mounted on the 2m Nayuta telescope during the observational run in 2012. Our evaluations includes the estimations of throughputs of low-resolution modes and the measurement of wavelength resolutions for useful three observational modes. The throughput is about 19 % at the maximum, which is $\sim 2/3$ times of the designed value. We confirmed that wavelength resolutions of three observational modes roughly agree with its designed values.

Key words: spectrograph – throughput – wavelength resolution – standard stars

1. はじめに

西はりま天文台 2m なゆた望遠鏡における可視光の中・低分散の分光観測は、恒星や高密度天体、活動銀河核などの天体で発生する時間変動現象の解明、数ヶ月から数年間にわたるような長期間のモニター観測や萌芽的な研究テーマの調査研究にとって極めて有効な観測モードである。なゆた望遠鏡が完成した 2004 年当時、国内の天文台には高分散分光か低分散分光に特化した装置が多く、ロングスリット分光器や、中分散分光という観点での装置はあまり存在しなかった。そこで当時西はりま天文台の研究者だった尾崎 忍夫氏（現・国立天文台）が多種の研究に耐え得る汎用性を持つスペックを割り出し、なゆた望遠鏡専用開発されたのが中・低分散ロングスリット分光器 (MALLS) である (Ozaki & Tokimasa, 2005)。2006 年から 2008 年にかけては科学研究利用をはじめ、高校生等の観測実習等教育目的にも多数利用された。また、各種利用性向上の作業や、性能評価も行われた経緯がある (Matsuda, 2007, 2009)。しかし、CCD カメラの不具合等に見舞われ、2009 年以降は定常運用が困難な状態となっていた。その後、2011 年度に新しい CCD カメラの購入が実現したことにより、2012 年に MALLS の各部調整を行い再稼働を果たした。2012 年現在において、2m 望遠鏡の中・低分散の分光機能は日本国内では貴重な観測モードであることに変わりはなく、また兵庫県立大学の研究施設としてなゆた望遠鏡の研究利用への需要がますます高まりつつある。このような状況の中、なゆた望遠鏡専用の観測装置として完成から 6 年が経過する MALLS の性能を再評価することは、今後のなゆた望遠鏡が担うべき観測的研究活動と教育・普及活動を進めていく上で重要なことである。そこで我々は MALLS で本格的な研究観測を行うために分光器の仕様として基本的な情報である効率と波長分解能の実測評価を一部の観測モードに関して実施したので報告する。

2. MALLS の概要

2012 年現在の MALLS の主な仕様を Table 1 にまとめる。2012 年に分光画像取得用の CCD カメラは FLI 社製 PL23042-1-B に変更された。この CCD カメラの主な仕様は改良後 MINT の CCD とほぼ同じである (参照 Takagi et al., 2012)。MINT 用の CCD カメラとの大きな相違点は、水冷により冷却能力について外気温-63 度を公称値とする点である。MINT に搭載されている同 CCD カメラのダーク、残像についての調査結果は本年報の Takagi et al. (2012) を参照されたい。

3. 再稼働前の作業と本体内部の調査

3-1. Andor CCD カメラによる光学系の調査

2011 年度には事前に光学部品の動作テストが実施された (2012 年 鳴沢らによる作業)。この作業の際には国立天文台岡山天体物理観測所と HBS 開発グループから支援を受け、ANDOR 製の CCD カメラを借用することでテストを行うことができた。

3-2. CCD カメラおよびシャッターの取り付け

新 CCD カメラを取り付けるために新しいフランジ部品の設計 (2011-2012 年 坂元による作業) が行われた。また、シャッターはこれまでどおり筐体内部のカメラレンズ直後に配置され固定されている。

Table 1. MALLS の主な仕様

MALLS 仕様			
観測可能波長	3800– 10000 \AA		
スリット幅	0.8 ″, 1.2 ″, 1.6 ″, 3.0 ″, 5.0 ″		
オーダー・カット・フィルター	WG320, GG495, BG40, GG475		
回折格子	150 l/mm	300 l/mm	1800 l/mm
分解能 ($R = \lambda/\delta\lambda$)@5000 \AA (スリット幅)	500(1.2″)	1300(0.8″)	9000(0.8″)
1 フレームに写る波長範囲	5000 \AA	1200 \AA	400 \AA
分散像のスリット長方向スケール	0.34 ″/pix		
スリットビューア視野	7' x 5'		

CCD カメラ仕様	
カメラ、CCD センサ	FLI PL23042-1-B、e2V CCD230-42
画素数、画素サイズ	2048×2048、15 μm
リニアリティ	5000ADU - 35000ADU \pm 0.25%
ゲイン	2.20 e^- /ADU
リードアウトノイズ	12.3 e^-

3-3. なゆた望遠鏡ナスミス焦点のイメージ・ローテータの清掃

MALLS の再稼働に先立ちなゆた望遠鏡側の鏡面の調査を行い、イメージローテータを構成する 3 枚の鏡面が汚れていることが明らかとなり清掃をした。清掃後、スリットビューア画像を利用したフラットランプの光度測定から、イメージローテータ全体の透過率は少なくとも約 30 % ほどにまで下がっていたことが明らかとなった。

3-4. MALLS 内部のメンテナンス

2012 年にはスリットビューアの合焦機能に問題が生じていた。またスリット鏡面に汚れが目立つ状態になっていた。このため、2012 年 11 月に MALLS をなゆた望遠鏡のナスミス台から下ろし、筐体内部の調査を行った。調査によってスリットビューアの合焦機構内の位置スイッチが故障していたことが判明したため交換した。また、スリットのガラス面にも汚れが付着していたため光学清掃具によって汚れを除去した。これらのメンテナンスによりスリットビューアの正常な使用が可能になった。

4. 性能評価

4-1. 効率 (スループット)

MALLS の効率測定を行うため、2012 年 11 月 29 日と 12 月 26 日のよく晴れた時間帯に測光分光標準星を観測した。この報告では、低分散モード (300 gr/mm, 5″ slit, 中心波長 5500 \AA) のみの効率について報告する。測定

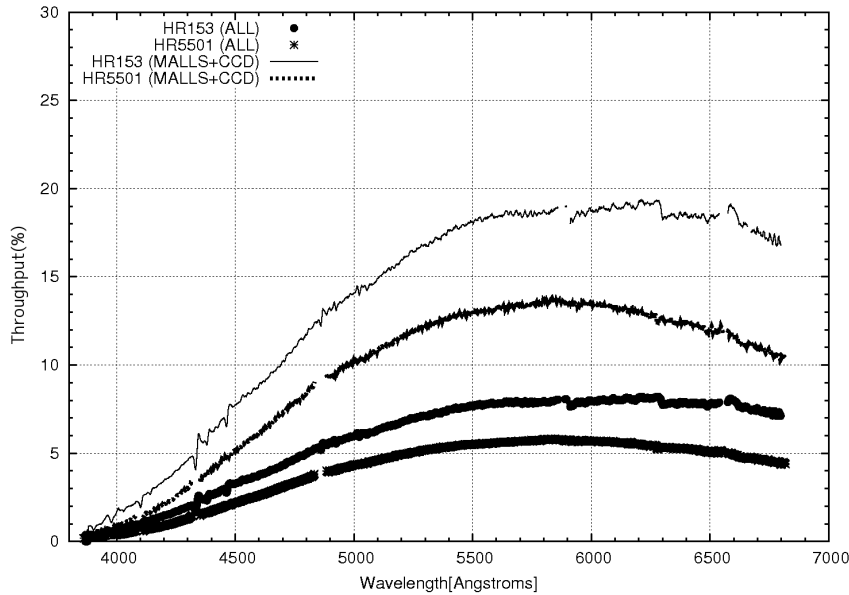


Fig. 1. 低分散モード (300 l/mm, 5" slit, 中心波長 5500Å) における効率曲線。横軸は波長 (Å)、縦軸は効率 (%) を示す。図には 2 つの標準星 (HR153, HR5501) について、望遠鏡の反射率、大気透過率、CCD の効率等全ての影響を含めた効率 (ALL) と、望遠鏡の鏡面反射率を 0.53、大気透過率を 0.8 として補正した分光器本体と CCD を含めた効率 (MALLS+CCD) を示す。

に利用した星は HR 153 (Spectral type B2IV, $V = 3.66, B - V = -0.19$)、HR 5501 (Spectral type B9.5V, $V = 5.68, B - V = -0.02$) である。標準星のフラックス・データは、HR 153 については ESO が運営している Web ページ "Optical and UV Spectrophotometric Standard Stars" から取得し、HR 5501 については同ページに情報がまとめられている Hamuy et al. (1992) によるものを取得した。効率測定に使うスペクトルは、上述した天体のスペクトル画像からダーク処理を行い、スカイを差し引いて 1 次元化した後、星自身のスペクトル画像から水素のバルマー線を使って波長校正した。波長とカウント (ADU) のスペクトルデータに、CCD カメラの gain ($2.20 e^-/ADU$) を掛けて、電子数 = 光子数として光子数のスペクトルを得た。標準星から届く本来の光子数の計算には Massey et al. (1988) に掲載されている式、 $N_\lambda = \frac{4.5E_{10}}{\lambda} \times 10^{-[(m_{AB} + A_\lambda X)/2.5]}$ を使用した。この式は、1 秒間に直径 1m の円の面積で受ける m_{AB} 等星の波長 λ (Å) での光子数 N_λ ($\lambda \cdot s^{-1}$) を見積る式である。ここで、 A_λ はエアマス毎の減光率であり、 X はエアマスである。本来は測光夜の天候が安定している時間帯に複数個の標準星を測定して A_λ を求め、大気減光量を見積もるべきであるが、今回の観測時間帯は快晴だったものの、その前後では雲が流れるような天候であったため精密な大気減光率の見積りは断念した。高度 50 度以上の観測であったため、エアマス毎の大気減光量の変化は無視できるものとしている。スリット幅は 5" を用いて星の光がほぼすべてスリットに入るようにした。

Figure 1 に観測値から直接得られた大気減光、望遠鏡の反射率、分光器自体の効率、CCD カメラの影響を含む効率 T_{ALL} と、望遠鏡の全反射率を $0.53 (= 0.9^6)$ 、大気透過率を 0.8 と仮定した場合の分光器本体と CCD カメラを含めた効率 $T_{MALLS+CCD}$ を示す。我々の測定結果は、 $T_{ALL} = 6-8\%$ 、 $T_{MALLS+CCD} = 14-19\%$ であった。大気透過率や鏡面反射率は今回仮定した値よりも小さいと考えられる。また、CCD カメラの量子効率やウィ

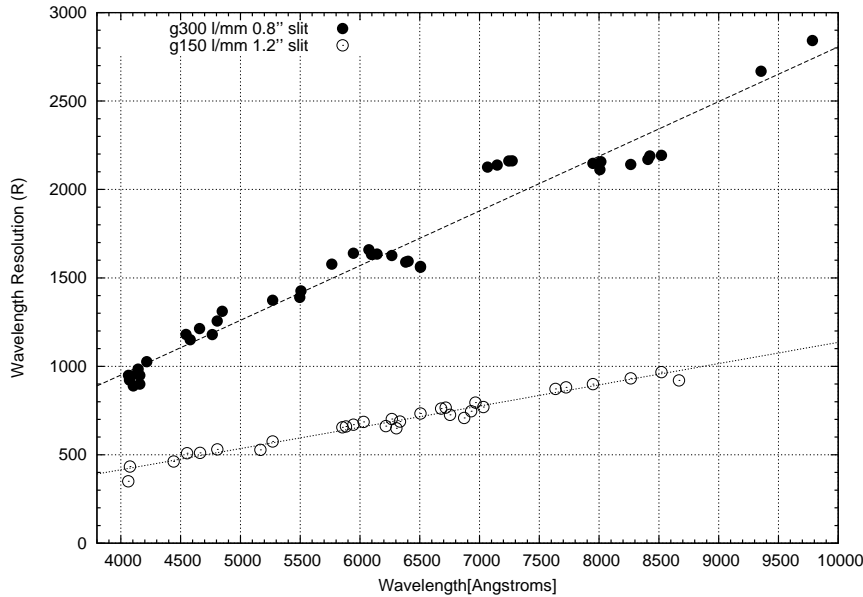


Fig. 2. 波長分解能 (低分散モード)

ンドウの透過率が 100 % 未満であるから測定値はいずれの仮定を置いた場合でも下限値である。

Ozaki & Tokimasa (2005) による設計値での最大効率[○]は 5500Å 付近で 30 % となっており、今回の測定結果は設計値に比べ約 2/3 の効率しか得られていないことを示す。一方で、2006 年に測定された効率は最大で約 12 % である。よって MALLS の効率は 2006 年に測定された時とほぼ同程度か、それよりも少し良い状態であると考えられる。なお、2006 年当時、設計値の約 1/2 の効率と算出される原因として、大気減光率の仮定の不確定性とイメージ・ローテータの鏡面の汚れの可能性が指摘されている。我々の測定値が 2006 年当時のものより良い傾向にある理由としては、イメージ・ローテータの反射率改善の効果が大きいと考えられる。なお、今回の測定でも全ての影響を含めた効率の最大値の差は大気透過率の違いによると考えられるが、大気透過率は未知であるため今回の効率の値のバラツキの原因を明確にするためには西はりま天文台での大気減光係数の測定を行う必要がある。

4-2. 波長分解能

Figure 2 と Figure 3 は、低分散と中分散のモードについて利用頻度が高いと考えられるスリット幅での 4000Å[○]–9000Å の波長分解能 ($R = \lambda_0 / \Delta\lambda$) である。分解能を得るために、1 次元化した比較光源画像の輝線成分に対し IRAF の `splot` タスクの `(k-k)` コマンドあるいは、`(g-g)` コマンドによるガウシアン・フィッティングを行い、得られた半値幅 (FWHM) の値を $\Delta\lambda$ とした。なお、測定には主に各波長領域の中にある強い単独輝線を選んだ。今回の結果から、現在の MALLS の分解能は Ozaki & Tokimasa (2005) の Figure 5. で示されている設計値と矛盾しないことを確認した。ただし Figure 3 の 8500Å 周辺の分解能が設計段階のものよりも小さくなっており、この原因は分かっていない。また、300 l/mm (slit = 0.8") のモードで測定した 6500Å[○]–6700Å 付近の輝線は、視野の端の方で撮影されており、像面が湾曲する影響を受けているため少し低い分解能になっていると考えられる。像面湾曲の影響は今後調査する必要がある。

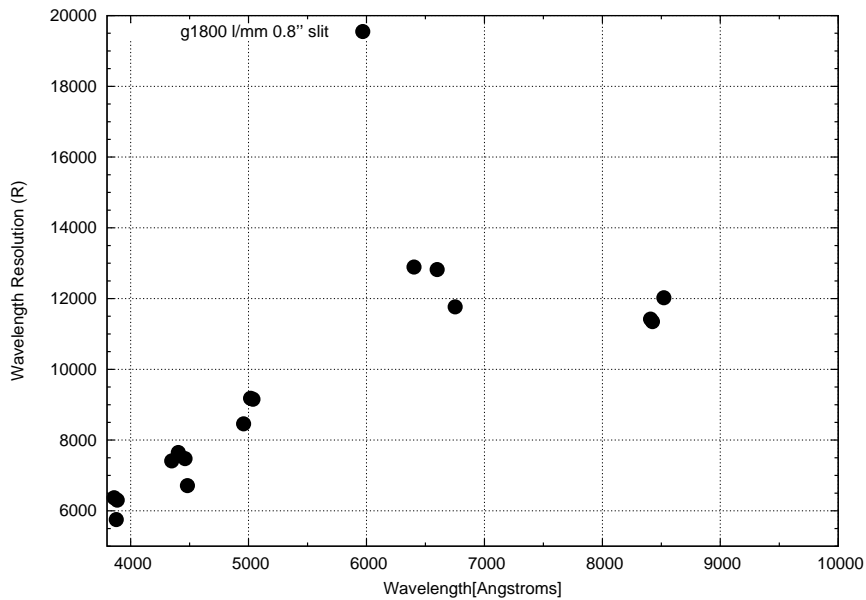


Fig. 3. 波長分解能 (中分散モード)

5. まとめ

我々はなゆた望遠鏡に設置されている MALLS を再び定常運用させるにあたり、(1) 光学系駆動パーツの確認、(2) 新 CCD の購入と取り付け、(3) MALLS 内部の清掃作業を行った。また、観測可能な状態になった後は効率ならびに波長分解能を測定し、(4) 効率は 2006 年当時と遜色ない値が出ていることを確認し、(5) 波長分解能は設計値と概ね一致することを確認した。

MALLS の再稼働に先立ち調整作業に使用させていただいた ANDOR 製 CCD カメラの借用をご許可いただいた国立天文台岡山観測所と HBS 開発グループの方々には多大な労力を惜しみなく払っていただきました。また、元西はりま天文台研究員の尾崎 忍夫氏、松田 健太郎氏、内藤 博之氏には、MALLS に関する過去の情報や、過去の観測データについて快くご相談に応じていただきました。これらの方々のご協力は今回の性能評価と MALLS の今後の運用を進めるにあたり多大な力となっておりますことを心から感謝いたします。

《参考文献》

- Ozaki, S. & Tokimasa, N. 2005, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., 15, 15
- Matsuda, K. 2007, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., 17, 16
- Matsuda, K. 2009, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., 2009, 19, 1
- Takagi, Y., Arai, A., Takahashi, J., Sakamoto M., Narusawa S., Itoh, Y. 2012, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., 22, 27
- Massey, P., Strobel, K., Barnes, J. V., Anderson, E., 1988, ApJ, 328, 315
- Hamuy, M., Walker, A. R., Suntzeff, N. B., Gigoux, P., Heathcote, S. R., Phillips, M. M., 1992, PASP, 104, 533