

MALLSのエシェルモード導入と初期性能

本田 敏志^{1,*} 古塚 来未^{1,2} 伊藤 洋一¹
¹兵庫県立大学 天文科学センター 西はりま天文台
²兵庫県立大学 理学研究科

Installation and initial performance of MALLS echelle mode

Satoshi HONDA^{1,*} Kurumi FURUTSUKA^{1,2} Yoichi ITOH¹
¹Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,
407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan
²Graduate School of Science, University of Hyogo
*honda@nhao.jp

(Received 2024 November 6; accepted 2024 December 6)

概要

MALLS (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) は兵庫県立大学西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡に搭載されているロングスリット分光器で、3つの回折格子を切り替えることで低分散 ($R (= \lambda/\Delta\lambda) \sim 600$) から中分散 ($R \sim 10,000$) までのモードで分光観測できる装置である。2018年にエシェルとクロスディスペルザをインストールし、エシェルモードでの観測を可能にした。初期のエシェルモードでの性能を調査した結果、波長分解能(R)は約35,000、波長域は4960–6800 Åのスペクトルが得られ、効率は中分散モード(1800本グレーティング)の3分の1程度であることがわかった。これは $V < 8$ 等級の比較的明るい星の化学組成などの調査に十分な性能である。

Abstract

MALLS is a spectrograph on the 2m Nayuta telescope at Nishi-Harima Astronomical Observatory in the University of Hyogo. The instrument can perform spectroscopy in the low to medium dispersion mode by switching between three gratings, but in 2018 an echelle and a cross-disperser were installed. Investigations of the performance in the initial echelle mode showed a wavelength resolution (R) of about 35,000, spectral coverage of 4960–6800 Å, and an efficiency of about one-third of that in the medium dispersion mode (1800 mm⁻¹ grating). The performance is sufficient for studying the chemical composition and other properties of relatively bright stars ($V < 8$).

Key words: Instrumentation:spectrograph — Nayuta — MALLS Echelle

1. はじめに

兵庫県立大学西はりま天文台に設置されている2mなゆた望遠鏡には、中低分散ロングスリット分光器：MALLS (Ozaki & Tokimasa 2005) が搭載されており、様々な観測において使用されている。MALLSは3つの回折格子と幅の違うスリットの組み合わせで、様々な波長分解能に対応し、150 mm⁻¹の回折格子を用いた場合には1回の露出で $R (= \lambda/\Delta\lambda) \sim 600$ 程度で可視域すべてをカバーすることができ、1800 mm⁻¹の回折格子を用いた場合には1回の露出で得られる波長域は400 Åとなるが、0.8秒幅のスリットを用いることで6000 Å付近で $R \sim 10,000$ 程度の波長分解能を得ることができる。

しかしながら、恒星の化学組成の研究や伴星の探査など、弱い吸収線や数km s⁻¹程度の微小な速度を測定するためには、波長分解能が不十分である。また、5分角に対応するロングスリットは空間分解した観測が可能であるが、2016年にイメージローテーターが撤去されたことに伴い、点光源を対象とした観測ではロングスリットは生かされていない。実際、現状の観測は恒星を対象に、できるだけ高い波長分解能で行われており、さらに高い波長分解能で広波長域での観測が求められていた。

ハワイ観測所すばる望遠鏡のHDS(Noguchi et al. 2002) 以外には国内の主な高分散分光器として、岡山188cm望遠鏡のHIDES (Izumiura 1999)やぐんま天文台1.5m望遠鏡のGAOESがあるが、HIDESは系外惑星探査を主な用途として改良が加えられており(Kambe et al. 2013)、GAOESは3.8mせいめい望遠鏡へ移設し、視線速度測定に特化した装置(GAOES-RV)への改造が行われた (Sato et al. 2024)。そのため、汎用性の高い高分散分光器が求められる。

我々はMALLSで高分散かつ広波長域での観測を可能にするために、エシェルモードの導入を行い、実際にエシェルスペクトルが得られることを確認しその性能評価を行った。以下、セクション2でエシェルモードの導入について述べ、セクション3では初期の試験観測とその結果を報告する。また、セクション4では今後の改良計画について述べる。

2. エシェルモードのインストール

MALLSはなゆた望遠鏡の搭載装置の中で現在最も頻繁に使われている装置である。そのため、現在の機能を維持しつつ、エシェルでの観測が可能となるよう改善する必要がある。そこで、現状の光学素子の配置を変更せずに、エ

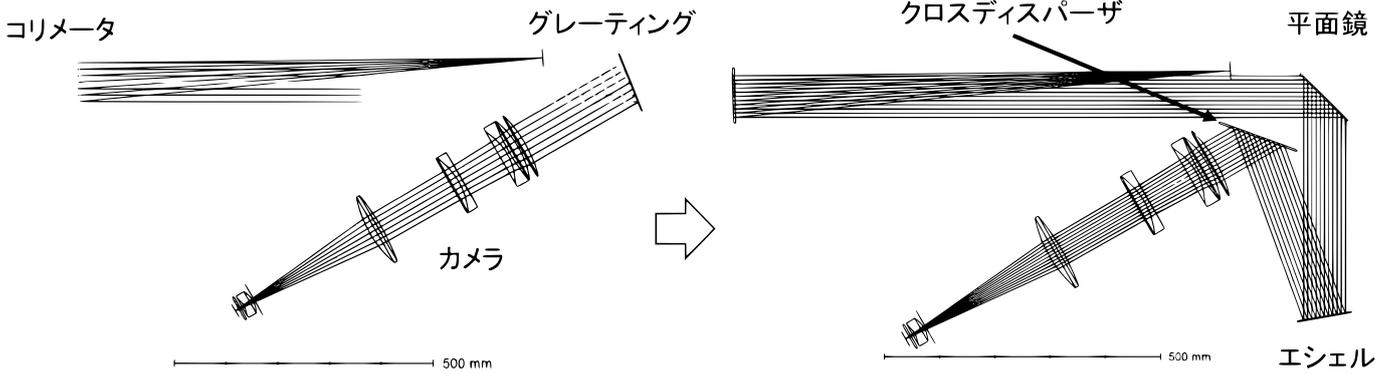


Fig. 1. The optical layout of long slit mode (left panel: Ozaki & Tokimasa 2005) and echelle mode (right panel). The change modes, switch to a plane mirror and inserting a cross-disperser.

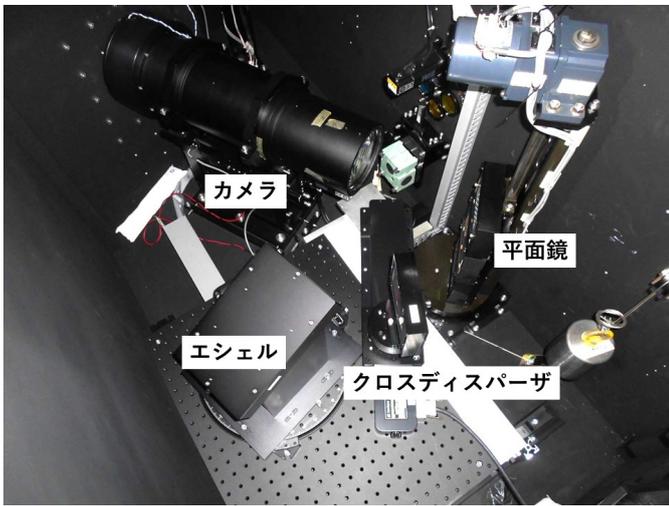


Fig. 2. Inside of the MALLS after installation of echelle and cross-disperser. The plane mirror is mounted on one of the grating holder.

エシエルとクロスディスペルザを導入することで、エシエルスペクトルを得られるように検討した。MALLS筐体はナスミス台上に設置されており、約 200×80 cmのサイズのジュラルミン製で、内部にスリットや比較光源、光学素子、カメラレンズが設置されている。スリットを通過した光は折り曲げ鏡を経て反射型のコリメータによって平行光にされた後に反射型グレーティングによって分光され、カメラへと導かれる (図1左、Ozaki & Tokimasa 2005)。そのため、リトロ配置でエシエルとクロスディスペルザを新たに設置するスペースは無く、また、現状のカメラの配置を動かすことなく従来のロングスリットでの観測と切り替えられることが望ましい。そこで、使用頻度の最も低い回折格子の一つを平面鏡に置き換えて筐体内の空いたスペースへ光路を折り返し、そこにエシエルを設置し、クロスディスペルザは自動ステージに搭載してカメラレンズの前に出し入れ可能とすることで、現状のモードを維持しつつエシエルモードでの観測を実現した (図1右と図2)。この配置の場合エシエルへの入射光角度 $\gamma = 10^\circ$ となり、スリット像の傾斜は大きくなる (cf., Tull et al. 1995; Pyo 2003¹)。

2.1. エシエルグレーティング

エシエル回折格子として、RGL (Richardson Grating Lab) 製のものが2018年に購入されておりそれを用いることとした。ブレイズ角 71.5° 、刻線は 31.6 mm^{-1} のもので、すばるHDSなどで用いられているものと同じである (Noguchi et al. 2002)。サイズは $110 \times 220 \times 30$ mmで、有効面積は 102×204 mmである。現状のMALLSでコリメータからの光束 ($\phi = 75$ mm) に対して、ブレイズ角の 71.5° に傾けると受けられる面積は元の光束の86%のサイズとなる。この回折格子はリトロ配置の場合で、100次での分解能は $200(\text{格子の総数}) \times 31.6 \times 100(\text{次数})$ で632,000となるが、実際に得られる波長分解能 R は、スリット幅とカメラの焦点距離、検出器の素子サイズによって制限される。MALLSはCCD面上で1秒角が 0.044 mmに対応し、CCDの1 pixelが $15 \mu\text{m}$ の場合3 pixelで 0.045 mmとなり、1秒角がCCDの3 pixelの対応するように設計されている。カメラの焦点距離は 341.5 mmで、この場合CCD面上における1秒スリットでの対応する波長幅は 0.13 \AA となり、これは 6000 \AA で $R \sim 45,000$ となる。MALLSで最も多く用いられている 0.8 秒幅スリットの場合は $R \sim 56,000$ となる。エシエルを保持するためのホルダーは新たに製作した。

2.2. クロスディスペルザ

エシエル分光器では、高い次数の回折光を用いることで高い波長分解能を得ることができる。しかし、分散された光は複数の次数の光が重なるため、分散方向と垂直方向にさらに分散させて各次数の重なりを解消する必要がある。これを行うために使用される分散素子はクロスディスペルザと呼ばれる。クロスディスペルザの分散が低すぎる場合、重なりを解消できず、波長の短い次数でスリット長(空間)方向に重なってしまう。一方、分散が高すぎると、検出器に収まる波長の範囲が狭くなるため、スリット長、使用する波長域、検出器のサイズなどを考慮して選択する必要がある。日本の主なエシエル分光器 (HDS、HIDES、GAOES) では、赤と青の波長域にそれぞれ対応するクロスディスペルザが用意されている。例えば、HDSでは赤用として 250 mm^{-1} ブレイズ角 5.00° 、青用として 400 mm^{-1} ブレイズ角 4.76° のグレーティングがあり、観測波長域に合わせて切り替えて使用されている (Noguchi et al. 2002)。

¹ https://www.naoj.org/staff/pyo/IRCS_and_Reduction/IRCS_reduction.html.html

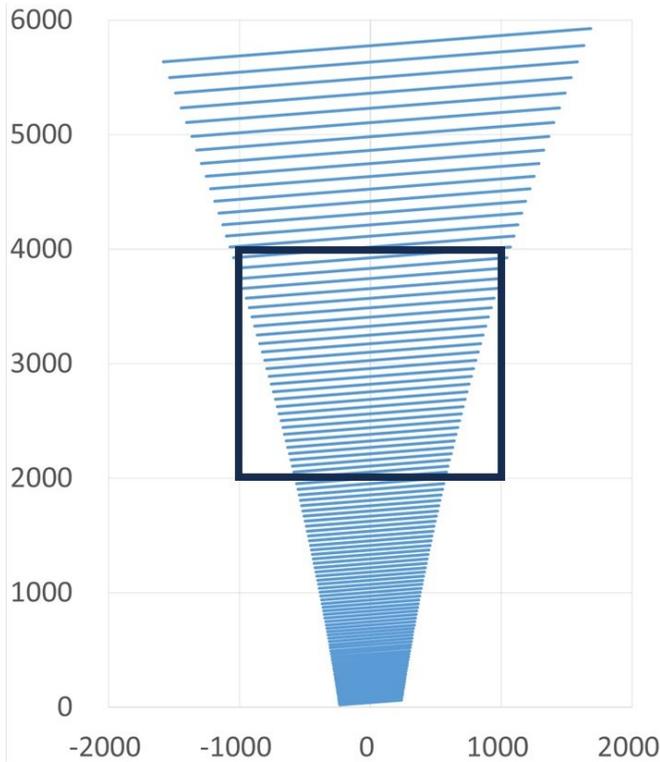


Fig. 3. The echelle format. The wavelength range from 9080 Å (order 65) to 3470 Å (order 170) is shown. The horizontal and vertical axis values are the number of CCD pixels. The square range indicates the range that corresponds to 2K × 2K. In the case of this figure, it corresponds to the 5400–7400 Å wavelength range.

MALLSではシンプルなシステムにすることで安定性を確保し、クロスディスペーザは1つの素子を固定した波長域で使用するものとした。使用するグレーティングとして 400 mm^{-1} のものを購入した。サイズは $110 \times 135 \times 25 \text{ mm}$ 、有効面積は $102 \times 129 \text{ mm}$ 、ブレイズ角は6.3度、ブレイズ波長は 5500 Å である。これはエシェルからの光束に対して90度で折り返しても十分な大きさを持つ。保持するためのホルダーには波長域の調整用に角度調節機構を持たせた。仮に 250 mm^{-1} の回折格子を用いた場合、波長範囲は広くとれるものの、現状のCCD($15 \mu\text{m pixel}^{-1}$)ではスリット長方向に10秒角のサイズを確保したときには、135次(4400 Å)以下で重なりが発生する。 400 mm^{-1} を用いた場合には、重なりが発生するのは140次(4200 Å)以下となる。5秒角であればどちらも可視域($> 3600 \text{ Å}$)で重なりは発生しない。

図3に 400 mm^{-1} をクロスディスペーザに用いた場合のエシェルフォーマットを示す。116次を超える波長域($< 5090 \text{ Å}$)ではフリースペクトラルレンジは検出器の幅の半分以下の領域となり、81次以下($> 7300 \text{ Å}$)では検出器にすべてが収まらなくなることが分かる。これらを考慮したうえで、設定する波長域を決めることとなる。

2.3. スリット

MALLSのスリットは、ガラス基板にアルミ蒸着とクロムコート(スリット部だけ蒸着無し)を施したものが5つターゲットに搭載されている。すべて5分角に対応したロングスリットのため、エシェル用のものを新たに用意する必要がある。他のスリットと同様の仕様で、スリット幅を

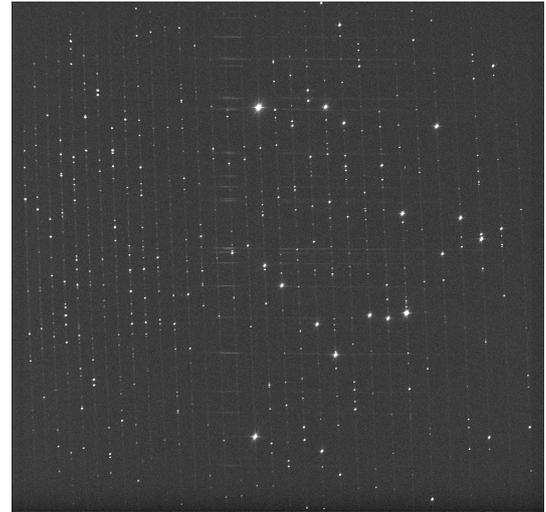


Fig. 4. The image of wavelength calibration lamp (Fe, Ne, Ar) obtained with the test slit.

約1秒角に対応する 0.12 mm 、スリット長方向は約5秒角に対応する 0.55 mm のものを新たに作成した。また、光軸の調整などに用いるための金属板を用いた粗いスリットも作成した。ただし、調整用スリットは厚みが 0.8 mm で開口部も粗い切り込みとなっているため、正確なサイズは測定できないが、入射面に対して20度傾けて使用すると、通過する光は入射部より細いものとなる。

3. エシェルモードの性能評価

光学素子の設置後に、調整用スリットと比較光源を用いて光軸の調整と波長域の確認を行った。クロスディスペーザの角度を変更することで、検出器に映る観測波長域が変わるため、実際に得られたスペクトルから波長域を確認し、 $4960\text{--}6800 \text{ Å}$ の波長域に設定した。またエシェルの角度も調整を行い、各次数での強度のピークが検出器の中央に来るようにした。エシェルのホルダーは 71.5° の角度で固定されているため、シムプレートを用いてホルダーの設置角度を変えることで調整を行った。ほぼ見積もり通りのエシェルフォーマットが得られ、波長域は118次の 4960 Å から、87次の 6860 Å の範囲とした。この波長域にはLi I(6707 Å)やH α (6563 Å)、Mg I($5167, 5173, 5184 \text{ Å}$)などのラインが含まれる。この場合オーダーカットフィルターは搭載されているGG475 (現在はLOPF405に交換されている)を使用することとなる。

3.1. 波長分解能

得られるエシェルスペクトルが十分な波長分解能を示しているか確認するために、調整用スリットを用いて取得した比較光源のスペクトルを1次元化し、波長校正を行った後にIRAFのsplotタスクを用いて輝線の半値幅測定を行った。概ね $R = 50,000$ 程度の波長分解能が得られた。設計の見積もりよりも高い値であるが、これは調整用スリットが1秒以下の幅に対応しているためと考えられ、実際に用いる1秒スリットを用いた場合よりも高い波長分解能が得られている。波長の短い方、特に 5500 Å 以下では波長分解能が落ちる傾向が見られる。 1800 mm^{-1} グレーティングを用いたロングスリットのスペクトルでも、検出器



Fig. 5. The image obtained with the slit use for observation (left panel) and the image of the slit for test observation (right panel) are presented. In the test observation slit, the image looks like a pinhole image.

面の端の方でやや悪くなる傾向が見られることから、カメラレンズによる像の歪み、もしくは検出器面の湾曲などが影響している可能性がある。

また、エシエルへの入射と出射が法線に対して10度の角度を持つ ($\gamma = 10^\circ$) ことなどから、実際の1秒スリットを用いた場合、検出器面に現れるスリット像は傾いたものとなっている (図5)。そのため、波長分解能を落とさず1次元スペクトルを得るには、像の傾きを補正するか (e.g., Ikeda et al. 2022)、スリットを空間方向に分割してそれぞれを波長校正した後に足し合わせるといった処理が必要である。MALLSでは検出器のピクセル方向から約60度傾いたスリット像となっている。MALLSではFe, Ne, Ar輝線を比較光源として用いているが、エシエルスペクトルでは次数によっては1-2本しか使えない場合もあるため、比較光源の像を用いてスリット像の傾きを補正するには不十分である。そこで、スリット像を空間方向に分割する1次元化の処理を行った。

1次元化の処理はIRAF²のapallタスクを用いて行った。傾いたスリット像を検出器のピクセル列方向に沿ってそのまま足し合わせると、傾いた分波長方向になまってしまうため波長分解能が落ちてしまう。そこで分散方向に複数に分割したスペクトルを作成した後に足し合わせる作業が必要となる³。各次数のスペクトルを波長方向にトレースする際に、5分割または10分割し、それぞれのスペクトルを波長校正した後に足し合わせた。この処理を行って得られたスペクトルの波長分解能 R は、35,000程度であった (図6)。これは調整用スリットで得られたスペクトルや設計値の波長分解能よりもやや悪くなっており、今後スリットの分割処理のさらなる改良によって波長分解能を上げられる可能性がある。

3.2. ロングスリットモードでの最高波長分解能スペクトルとの比較

MALLSで最も使われているロングスリットでの観測は、できるだけ高い波長分解能が得られる0.8秒スリットと1800 mm⁻¹回折格子の組み合わせで得られる $R \sim 10,000$ (6500 Å)での観測である。この場合一度に得られ

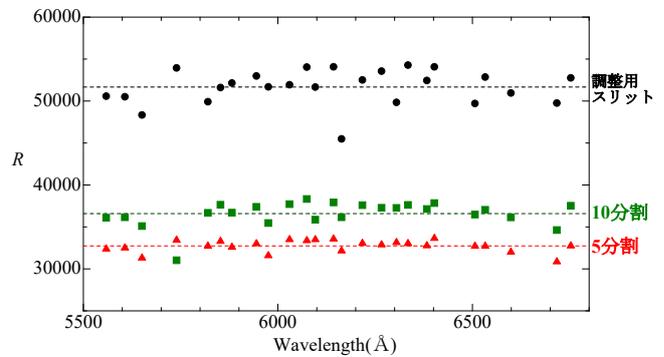
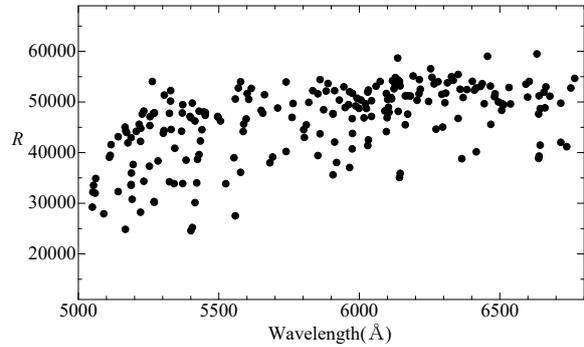


Fig. 6. The wavelength resolution of the comparison spectrum obtained with the test slit (upper panel) and that with the 1 arcsec slit used for the observation is estimated using the same lines for each wavelength range (wavelength range above 5500 Å) (lower panel). Red and green indicate reductions of 5 and 10, respectively, in the estimate with the 1 arcsec slit.

る波長域は400 Åとなる。図7にロングスリットとエシエルで比較したスペクトルを示す。エシエルでは波長分解能は3倍以上となり、波長域も4倍以上に広がり、弱い吸収線の数 mÅ程度の等価幅測定や、10 km s⁻¹以下の速度分解能を得ることが可能である。図8は、MALLSのエシエルで得られた $S/N \sim 200$ の月(太陽)のスペクトルで測定した等価幅をMoore et al. (1966)の太陽スペクトルの等価幅表のものと比較したものである。ばらつきはあるものの、非常に弱い吸収線まで一致する傾向を示した。

また、1素子あたりで得られる S/N をロングスリットでの観測と比較するために、HD44007 ($V = 8.06$, G5IV)を1200秒露出の観測を行い、 S/N を見積もると28程度であった。観測時のエアマスは1.6だった。これはロングスリットで得られる S/N の1/3-1/4程度であり、得られる光子数としては1/10程度となる。同じサンプリングで波長分解能が3倍程度高いことを考慮するとスリット幅の違いも含めておおよそ1/3程度の効率であると言える。エシエルモードでは回折格子と平面鏡がそれぞれ1つ余分に加わったことに加え、エシエルの有効面積が光束に対して86%のサイズであることなどが効率低下の原因と考えられる。ロングスリットでの効率は、大気減光や望遠鏡を含めた値とし

² IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

³ cf., <http://www.o.kwasan.kyoto-u.ac.jp/inst/gaoes-rv/dataanalysis.j.html>

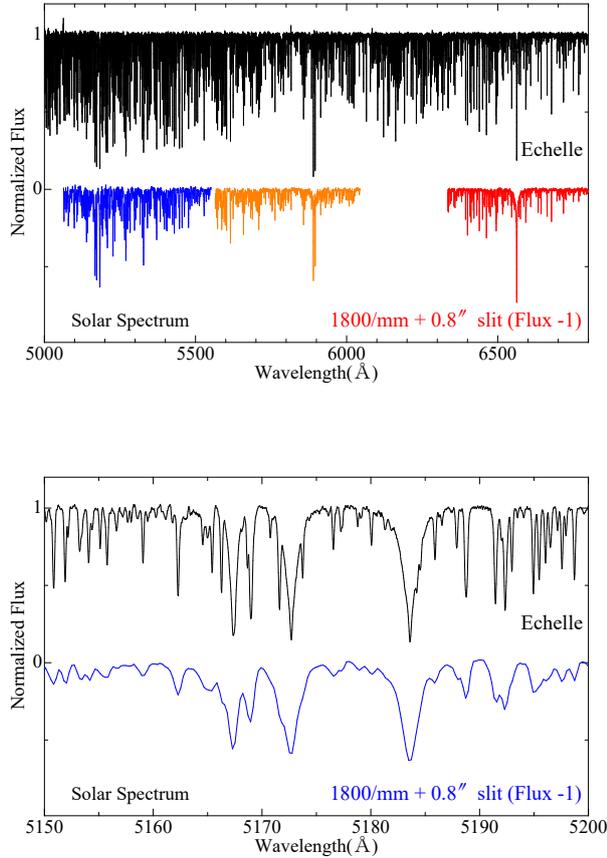


Fig. 7. (Upper panel) The spectra of the Sun (Sky) obtained with the test slit and the Sun (Moon) obtained with the long slit. The long slit spectrum show the wavelength range portion of three observations at the highest wavelength resolution with a 0.8 arcsec slit and 1800 mm^{-1} grating. (Lower panel) Comparisons of spectrum near the Mg b line. Upper (black line) is Echelle and lower (blue line) is long slit.

て 150 mm^{-1} を用いた場合で 6–8% の値が見積もられている (Arai et al. 2012)。 1800 mm^{-1} を用いた場合の測定値は無く、また、主鏡反射率の違いやイメージローテーター撤去による効果を見積もることが困難なため、現状のエシェルモードでの正確な効率の見積もりはできないが、望遠鏡や大気減光などすべてを含め 3% 程度と見られ、装置の効率測定は今後の課題である。

4. 今後

MALLS へのエシェルモードの導入によって、高分解能かつ広波長域での観測が可能となったが、実際に得られるスペクトルの波長分解能は設計値よりもやや低いものとなっている。これはスリット像が検出器のピクセル方向から大きく傾いたものとなっているため、スペクトルを抽出時の処理が不十分なためと考えられる。そのため、スペクトル抽出処理手法の改良によって波長分解能を落とさない処理を今後検討する必要がある。せいめい望遠鏡の GAOES-RV では傾いたスリット像の対応として、分散方向に 1 ピクセルずつトレースを行い、波長校正を行った上で加算する手法で処理を行っている。現状の MALLS で

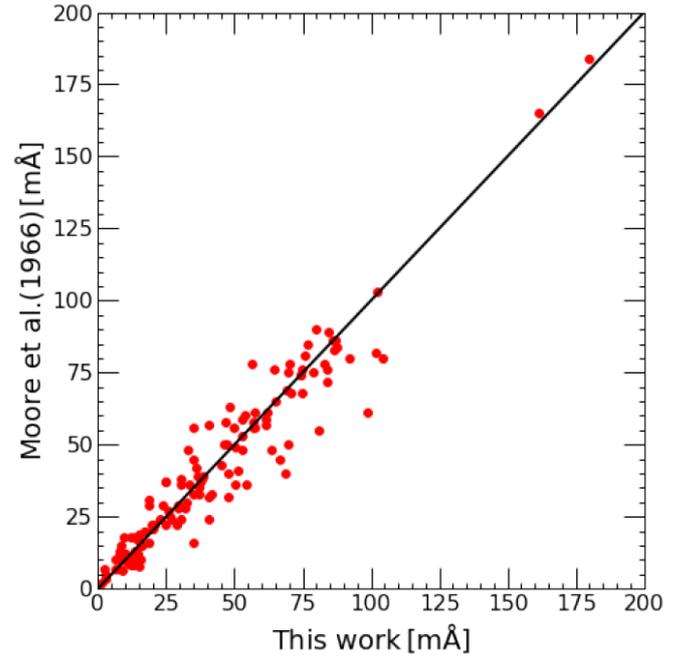


Fig. 8. The equivalent widths measured in the solar spectrum (Moon) obtained with the MALLS echelle are compared with the solar equivalent widths of Moore et al. (1966).

は波長校正に Fe, Ne, Ar 輝線を用いており、十分な数の輝線が無い場合上記の処理を同様に適用することは出来ない。今後、MALLS への Th, Ar ランプの導入などが求められる。

また、現状のクロスディパーザーは、必ずしも最適化されたものではなく、入手が容易な回折格子から選択されたものであり、より高効率が見込めるプリズム、あるいはグリズム化によって効率の向上と観測波長域の拡大が考えられている。

波長域は検出器センサーのサイズ ($15 \mu\text{m}$, $2\text{K} \times 2\text{K}$) で制限されているため、よりセンサーサイズの大きなものへ交換することで波長域を広げることができる。試験的に取り付けられた $2\text{K} \times 4\text{K}$ の検出器では $4400\text{--}7400 \text{ \AA}$ の波長域が得られることが確認されており、近い将来 CCD の交換が見込まれている。

5. まとめ

MALLS にエシェルモードをインストールし、ロングスリットモードでの観測と切り替えられるようにし、エシェルモードでそれまでの最高波長分解能より高い、 $R \sim 35,000$ 程度のスペクトルが $4900\text{--}6800 \text{ \AA}$ で取得できることを確認した。これはロングスリットモードでの観測と比べ、3 倍の波長分解能で 4 倍以上の波長域となる。これにより数 m\AA 程度の吸収線等価幅の測定や 10 km s^{-1} 以下の速度分解能の観測が可能となった。しかしながら、得られる波長分解能は設計値よりもやや低い値となっており、傾いたスリットの処理などによるものと考えられる。また、効率はロングスリットでの観測の $1/3$ 程度であり、対象としては $V < 10$ の天体となる。今後は、波長分解能を落とさない処理を検討すると共に、CCD の交換により観測波長域を広げることや、クロスディパーザーの交換で、より最適なエシェルフォーマットを検討することが考

えられる。

謝辞

MALLSのエシエル導入については文部科学省の共同利用・共同研究拠点による助成(平成28年度、令和4年度更新)を受けた。

References

- Arai, A., Takagi, Y., Honda, S., Sakamoto, M., Narusawa, S., & Itoh, Y. 2012, Annual Report of the Nishi- Harima Astronomical Observatory, No. 22, 34
- Ozaki, S., & Tokimasa, N. 2005, Annual Report of the Nishi- Harima Astronomical Observatory, No. 15, 15
- Ikeda, Y., et al. 2022, PASP, 134, 015004
- Izumiura, H. 1999, in Proc. 4th East Asian Meeting on Astronomy, ed. P. S. Chen (Kunming: Yunnan Observatory), 77
- Kambe, E., et al. 2013, PASJ, 65, 15
- Moore, C. E., Minnaert, M. G. J., & Houtgast, J. 1966, National Bureau of Standards monograph 61, The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å (Washington, DC: US Govt. Printing Office)
- Noguchi, K., et al. 2002, PASJ, 54, 855
- Sato, B., et al. 2024, Proceedings of the SPIE, 13096, 44
- Tull, R. G., MacQueen, P. J., Sneden, C., & Lambert, D. L. 1995, PASP, 107, 251