

天体観測用分光器のための波長校正ユニットの開発*

(第25回科学部研究報告)

Development of Wavelength Calibration Unit of Astronomical Spectrograph. (The 25th Report of the Science Club of Yonago National College of Technology)

吉田 浩瑛**, 前田孝太郎****, 足立 悠斗**, 遠藤 愛***, 柏木 琴葉****
Hiroaki YOSHIDA, Koutarou MAETA, Yuuto ADACHI, Ai ENDOU, Kotoha KASHIWAGI

鐘築昇太郎**, 仲西 涼*****, 原田 果歩****, 松本 有未**,
Shotaro KANETSUKI, Suzu NAKANISHI, Kaho HARADA, Ami MATSUMOTO,

竹内 彰継*****, 山脇 貴士*****
Akitsugu TAKEUCHI, Takashi YAMAWAKI

概要

米子高専科学部は、天体観測用分光器に波長校正光源の光を入射させる装置「波長校正ユニット」を新しく開発し、2024年9月に鳥取県内の公開天文台等へ寄贈した。本ユニットは既製品の光路切換装置に望遠鏡の接続リングを組合せるだけで非常に簡単に製作できる。また、サトーパーツ製のパイロットランプ (Ne-Xe ランプ) を波長校正光源とした。このことにより、既製品の波長校正ユニットが10~25万円程度と高額であるのに対し、本ユニットは2万6千円と極めて安価に製作できる。さらに、すでに複数の高校天文部が保有している昭和機械製作所製のVEGA等の既製の分光器にも接続できるよう工夫した。本ユニットは、天体分光観測を行う上で非常に強力なツールになると考えている。そこで、本ユニットの製作・使用方法は近日中に米子高専HPに掲載する予定である。なお、この研究は2025年日本天文学会春季年会ジュニアセッションで発表した研究である。

1. はじめに

天体分光学は、ブンゼンとキルヒホッフが望遠鏡に分光器を取付けて観測し、太陽にナトリウムが存在することを発見したことから始まった。その後のハギンスによる星雲線の発見やピッカリングのグループによる恒星の分光分類は、量子力学の発展と相まって、天体の物理状態解明のための強力な原動力となった。そして、ハッブルによる宇宙膨張の発見は天文学上の20世紀最大の発見となり、天体分光学の重要性はゆるぎないものとなった¹⁾。

米子高専には形式の異なる4種類の天体観測用分光器があり、科学部は10年以上前から天体分光観測に取り組んできた。例えば、朝日新聞社主催の第20回高校生・高専

生科学技術チャレンジ (JSEC2022) では皆既月食の分光観測で地球のオゾン層の状況がモニターできることを報告した²⁾。

ところが、天体分光観測は天文学の研究において基本かつ最重要であるにもかかわらず、全国125ヶ所の公開天文台のうち分光器を保有している施設はわずか15ヶ所にとどまっていることが判明した。その原因は分光器が小型のものでも約150万円と高価なため³⁾、公開天文台の定常予算では購入不可能ということにあると考えられる。そこで、自作しやすい簡単な構造だが物理観測も可能な天体観測用分光器を開発し、2023年9月に鳥取市の公開天文台であるさじアストロパークに(図1)、2024年2月には米子市児童文化センターに、それぞれ1台ずつ寄贈した⁴⁾。

なお、この分光器の開発をJSEC2023で発表したところソニー賞を受賞して日本代表に選出され、2025年5月にアメリカのロサンゼルスで開催された世界学生科学技術フェア (ISEF2024) では物理学・天文学分野で優秀賞4等を受賞することができた(図2)。

* 原稿受理 令和7年1月21日

** 機械システムコース学生

*** 電気・電子コース学生

**** 化学バイオコース学生

***** 建築デザインコース学生

***** 教養教育部門

***** ものづくりセンター



図1 製作した分光器をさじアストロパークに寄贈



図2 ISEF2024 で物理学・天文学分野優秀賞4等受賞

ところで、実際の分光観測では波長が既知の光源「波長較正光源」の光を分光器内に導入し天体のスペクトルに波長付けを行う作業、つまり「波長較正」を行う必要がある。しかし、分光器を寄贈したさじアストロパークの연구원の方から、寄贈した分光器では波長較正光源のスペクトルの撮像が困難であるとの報告を受けた。

小型望遠鏡の場合、図3のように望遠鏡の筒先に白板を置き、そこで波長較正光源の光を反射させて望遠鏡内に導入して波長較正を行う。しかし、大型望遠鏡の場合はそのような操作が困難であるとの報告であった。

天体分光観測の効率を向上させるためには、分光器側に波長較正光源の光を入射させる機構があったほうが良い。一方、分光器に波長較正光源の光を入射させる装置を「波長較正ユニット」という。そこで、鳥取県教育委員会の高校生向け活動予算である「とっとり夢プロジェクト事業補助金」の交付を受けて波長較正ユニットを製作した。本研究ではこの波長較正ユニットの設計・製作と性能評価について報告する。



小型望遠鏡での波長較正・フラット撮像の様子。白板で較正光源の光を反射させ、望遠鏡内に導入する。

図3 波長較正光源の光の望遠鏡内への導入

2. 波長較正ユニットの製作

2.1 波長較正ユニット本体の製作

本波長較正ユニットは、本校が開発した分光器だけでなく、昭和機械製作所製の VEGA 等のようなすでに複数の高校天文部で利用されている既成の分光器でも接続できる構造とした。そのため、図4のようにピクセン製のフリップミラー（光路切替器）を組み合わせた構造とし、誰でも簡単かつ安価に製作できるように工夫した。

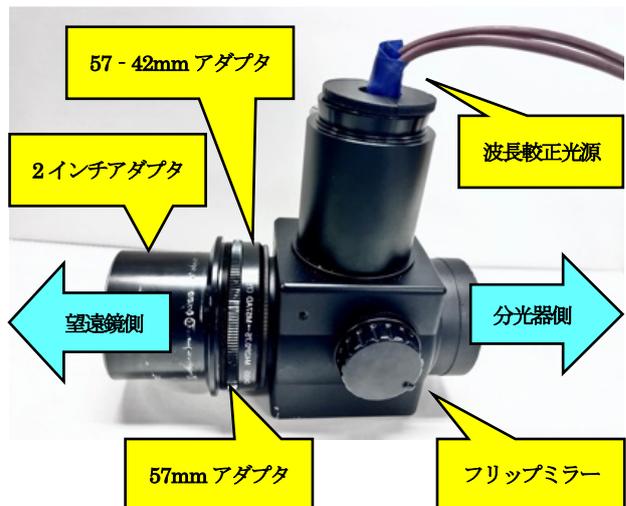


図4 波長較正ユニットの構成

本ユニットは、図5のように望遠鏡と分光器の間にはさんで使用する。このような構造にすると望遠鏡に長いバックフォーカスが必要となる。しかし、最近の屈折望遠鏡やシュミットカセグレン望遠鏡ならばVEGAを接続した場合でも問題なく合焦できることが確認できた(図6,7,8)。



図5 本波長校正ユニットは望遠鏡と分光器の間にはさんで使用する



図6 大型望遠鏡のガイド鏡として利用されることが多いタカハシ製屈折望遠鏡FS-128 では合焦が確認できた

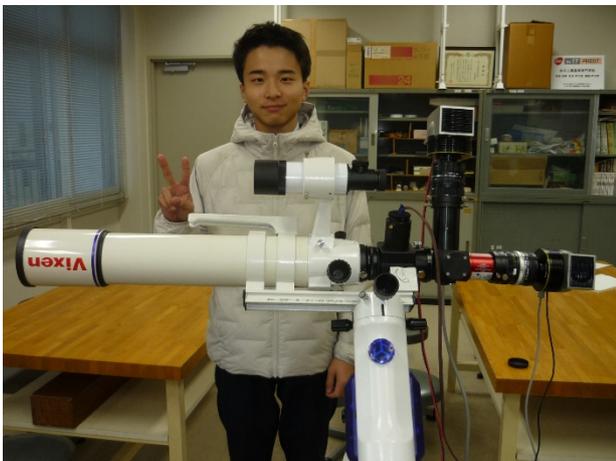


図7 高校天文部の利用が多い小型望遠鏡ビクセン製ED81Sでも合焦が確認できた



図8 高校天文部の利用が多い大型望遠鏡 Meade 製シュミットカセグレンでも合焦が確認できた

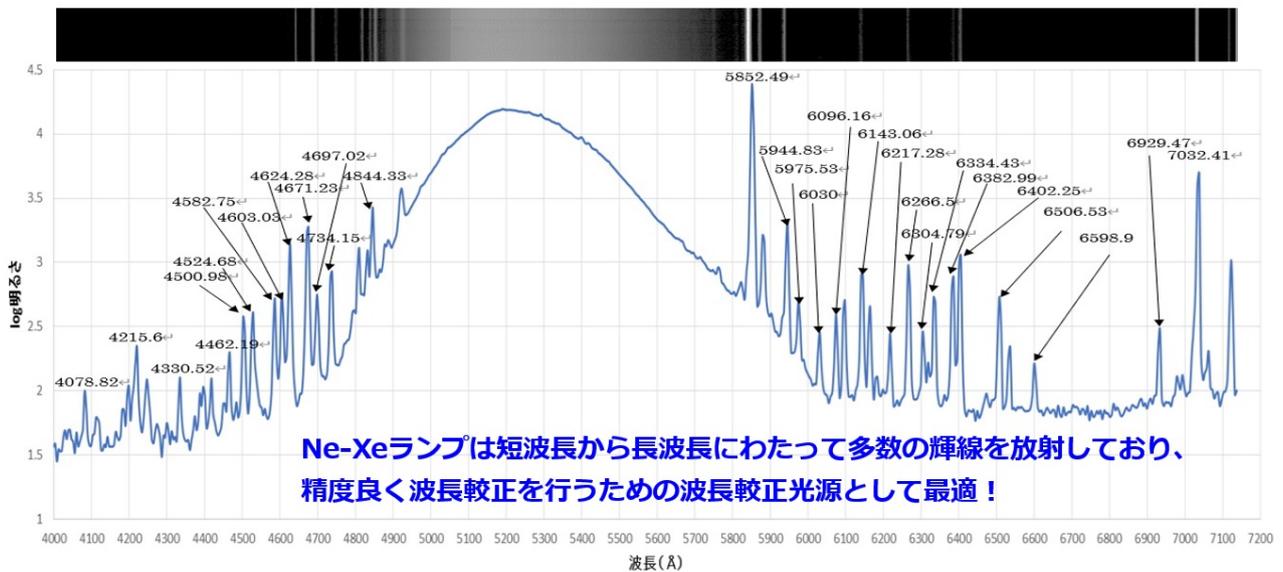


図9 サトーパーツのパイロットランプ (Ne-Xe ランプ) のスペクトル



図10 左：Ne-Xe ランプの光源保持具 右：ランプを光源保持具ではさんで波長較正ユニットの入射口に挿入する

2.2 波長較正光源の選択と光源保持具の製作

波長較正用光源にはサトーパーツのパイロットランプ (Ne-Xe ランプ) を利用した。このランプは千円以下と極めて安価に手に入る。そのため、既製品の波長較正ユニットが 10~25 万円と非常に高額なのに対し、本ユニットは 2 万 6 千円と極めて安価に製作できた。

しかも、Ne-Xe ランプは図 9 のように短波長から長波長にかけて数多くの輝線を放射しており、十分な精度で波長較正を行うことができる。

また、Ne-Xe ランプが本ユニットの 31.7mm 径の入射口に挿入できるように、3D プリンタで図 10 のような光源保持具を製作した。この光源保持具の CAD データは本校科学部の HP 上にアップする予定であり、本データをダウンロードすれば誰でも 3D プリンタで製作できるようにする予定である。

ところで、本ユニットの名称は、昨年製作した分光器が TORIHIME (totTORI High performance spectroMEter) であることから、織姫・彦星の七夕伝説にあやかって TORIHICO (totTORI High performance wavelength CalibratiOn unit) と命名した。

3. 本波長較正ユニットを用いた観測

3.1 天体分光観測の手順

天体分光観測は通常以下の①~⑥の手順で行う。

- ① 目標天体のスペクトルの撮像
- ② 波長較正光源の撮像
- ③ フラット光源の撮像
- ④ 分光標準星のスペクトルの撮像
- ⑤ 波長較正光源の撮像
- ⑥ フラット光源の撮像

公開天文台の大型望遠鏡でも 容易に波長較正が行える！

TORIHICOではNe-Xeランプを
入射口に挿すだけでOK！



図11 本波長較正ユニットを用いた波長較正

分光感度補正も容易に行える！

分光感度補正 → スペクトル強度を正しい値に補正する操作

因州和紙を光源のディフューザー
(光を均一に拡散する物)とすると
4500Åから6500Åまでの分光
感度補正関数がほぼ直線となる！

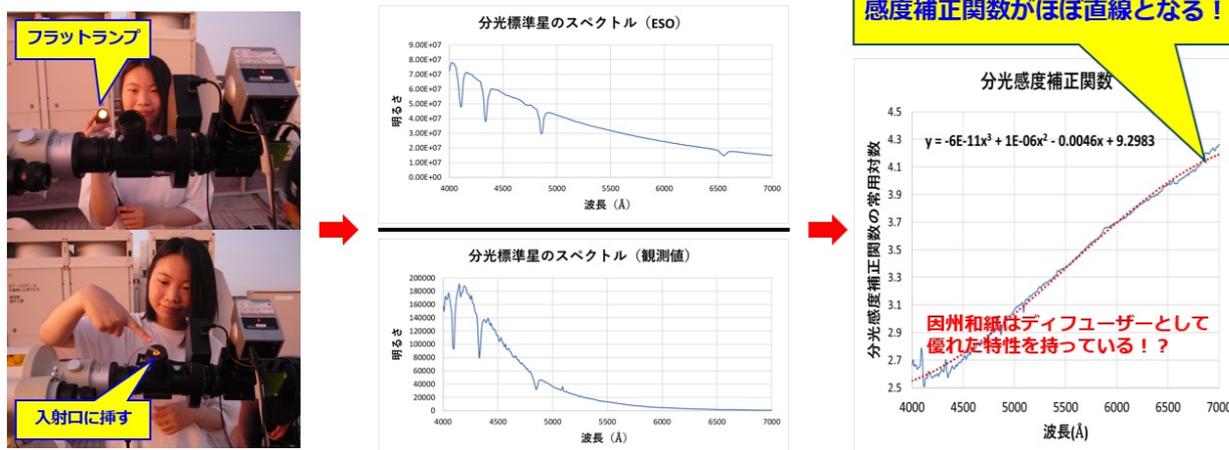


図12 本波長較正ユニットは波長較正光源の代わりに白熱電球を差し込めば分光感度補正が行える

このように、天体分光観測においては観測天体ごとに①～⑥の撮像を行う必要がある。この時、図3のように波長較正光源とフラット光源の撮像を望遠鏡の筒先から入射させる方式で行うと、操作が煩雑で観測に要する時間が長くなり、観測する天体数が減少する危険性がある。しかし、本ユニットを用いると波長較正光源とフラット光源の撮像が以下で記述するように非常に容易になり、天体分光観測の効率が向上する。

なお、厳密には①～⑥の各撮像の後に(画像の暗電流を除去するために)望遠鏡に蓋をして同じ露光時間でダーク画像を撮像せねばならないが、今回はその記述は省略した。

3.2 波長較正光源の撮像

まず、分光観測後(分光器等のたわみを変化させないため)望遠鏡の駆動装置を停止する。その後、図11のように本ユニットの入射口にNe-Xeランプを挿入し、光路をランプ側に切り替えてスペクトルを撮像すると図9のようなスペクトルが得られ、波長較正を行うことができる。

3.3 フラット光源の撮像

CCDカメラの素子の上にゴミが付着しているとその部分に入射した光が弱められ、スペクトルに斑が生じる。その場合、分光器に一樣な光を入射させ、その一樣光の

スペクトルで天体のスペクトルを割り算すると先程の斑を取り除くことができる。このような補正を「フラット補正」と呼ぶ。

本ユニットの場合、図 12 のように白熱電球をフラット光源として入射口に挿入して撮像し、フラット補正を行う。なお、一様な光を作るためには光を均一に拡散させるディフューザーが必要となるが、本ユニットでは鳥取県特産の因州和紙をディフューザーとして利用した。また、このときも分光器等のたわみを変化させないため望遠鏡の駆動装置を停止する必要がある。

3.4 分光感度補正

CCD カメラの感度は光の波長の関数 $E(\lambda)$ で表せる。したがって、天体のスペクトルを $I_{\text{True}}(\lambda)$ とすると観測された天体のスペクトル $I_{\text{Obs}}(\lambda)$ は、

$$I_{\text{Obs}}(\lambda) = E(\lambda) \times I_{\text{True}}(\lambda) \quad \dots (1)$$

となる。また、フラット光源のスペクトルを $I_{\text{FlatTrue}}(\lambda)$ 、その観測値を $I_{\text{FlatObs}}(\lambda)$ とすると、(1)式と同様にして、

$$I_{\text{FlatObs}}(\lambda) = E(\lambda) \times I_{\text{FlatTrue}}(\lambda) \quad \dots (2)$$

の関係が成立する。

一方、フラット補正とは $I_{\text{Obs}}(\lambda)$ を $I_{\text{FlatObs}}(\lambda)$ で割り算したものであるから、

$$\frac{I_{\text{Obs}}(\lambda)}{I_{\text{FlatObs}}(\lambda)} = \frac{E(\lambda) \times I_{\text{True}}(\lambda)}{E(\lambda) \times I_{\text{FlatTrue}}(\lambda)} = \frac{I_{\text{True}}(\lambda)}{I_{\text{FlatTrue}}(\lambda)}$$

$$\therefore I_{\text{True}}(\lambda) = \frac{I_{\text{Obs}}(\lambda)}{I_{\text{FlatObs}}(\lambda)} \times I_{\text{FlatTrue}}(\lambda) \quad \dots (3)$$

となり、正しい天体のスペクトル $I_{\text{True}}(\lambda)$ を求めるにはフラット光源のスペクトル $I_{\text{FlatTrue}}(\lambda)$ をかける必要がある。

このように観測された天体のスペクトル $I_{\text{Obs}}(\lambda)$ から正しいスペクトル $I_{\text{True}}(\lambda)$ を求める操作を「分光感度補正」という。

分光感度補正は（大気減光の影響を避けるために）観測天体の近傍にある「分光標準星」を撮像して行う。分光標準星とは長年の観測でスペクトルが時間変動しないことが分かっており、波長ごとのスペクトルの強度が精密に測定され数値化されている恒星のことであり、そのスペクトルデータは、例えば ESO (European Southern Observatory) の分光測光標準星スペクトルデータベース

<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

を利用すると入手できる。

分光標準星の既知のスペクトルを $I_{\text{STDTrue}}(\lambda)$ 、観測されたスペクトルを $I_{\text{STDObs}}(\lambda)$ とすると(3)式より、

$$I_{\text{STDTrue}}(\lambda) = \frac{I_{\text{STDObs}}(\lambda)}{I_{\text{FlatObs}}(\lambda)} \times I_{\text{FlatTrue}}(\lambda)$$

$$\therefore I_{\text{FlatTrue}}(\lambda) = \frac{I_{\text{FlatObs}}(\lambda)}{I_{\text{STDObs}}(\lambda)} \times I_{\text{STDTrue}}(\lambda) \quad \dots (4)$$

したがって、(4)式のように分光標準星の既知のスペクトル $I_{\text{STDTrue}}(\lambda)$ を撮像されたスペクトル $I_{\text{STDObs}}(\lambda)$ で割り算することにより分光感度補正関数（実際はフラット光源のスペクトル） $I_{\text{FlatTrue}}(\lambda)$ を求め、(3)式のようにフラット補正した観測天体のスペクトルにかけて分光感度補正を行う。

TORIHICOでの分光感度補正の正確さの確認

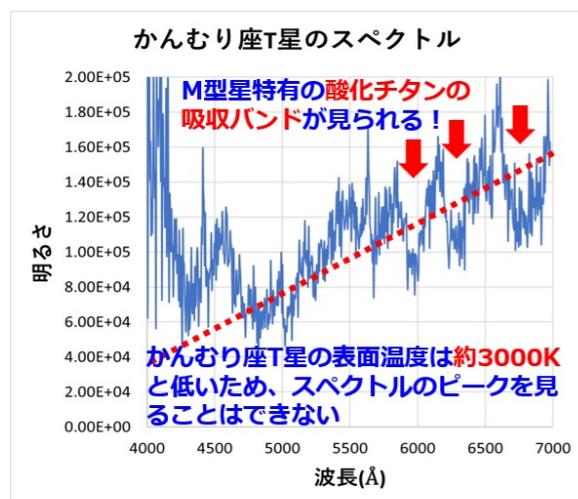
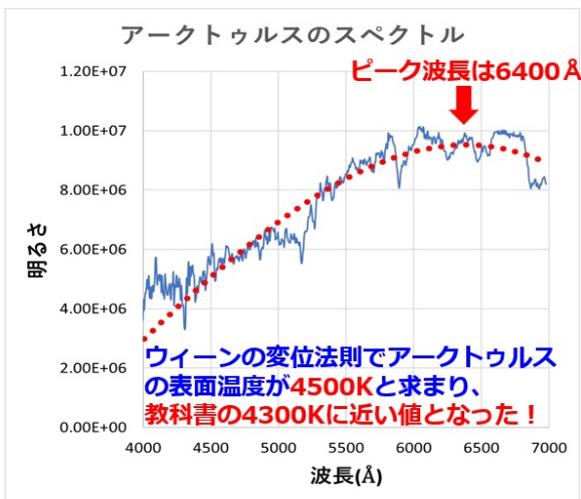


図 13 左：アークトゥルスのスペクトル 右：かんむり座 T 星のスペクトル

3.5 本波長較正ユニットを用いたテスト観測

本ユニットを用いた分光観測が正しく行われているか確かめるために2024年8月22日に本校屋上にてテスト観測を行った(図6)。

タカハシ製フローライト屈折望遠鏡に本ユニットと昨年開発した分光器を装着し、タカハシ製JP型赤道儀に搭載して観測を行った。観測天体はうしかい座 α 星アークトゥルスとかんむり座T星で、分光標準星はおおぐま座 η 星である。

なお、かんむり座T星は回帰新星であり、約80年周期で伴星の白色矮星が爆発を繰り返しており、テスト観測当時9月までに爆発する確率が高いと予測されていた天体である。

まず、アークトゥルスの分光感度補正を行った。その結果、図13の左のようにスペクトルのピークは6400Åにあり、ウィーンの変位法則から表面温度が4500Kであることが示された。一方、アークトゥルスはK型の巨星であり、その表面温度は4300Kと知られているためほぼ正しい結果が得られたと考えられる。

続いて、かんむり座T星はM型の巨星であるため、可視光線の範囲ではそのスペクトルのピークを見ることはできない(図13右)。一方、スペクトルには6000Åより長波長側に大きなへこみがみられた。これはM型星特有の酸化チタンの吸収バンドと考えられる。このことから、かんむり座T星のスペクトルも正しい結果が得られたと考えられる。



図14 さじアストロパークでの贈呈式

4. 本波長較正ユニットの贈呈

4.1 本波長較正ユニットの贈呈

本ユニットは鳥取県教育委員会の高校生向け活動予算である「とっとり夢プロジェクト事業補助金」の交付を受けて製作した。そして、補助金申請の際、製作した波長較

正ユニットをさじアストロパークと米子市児童文化センターに贈呈することを明言した。

そこで、2024年9月6日にさじアストロパークに(図14)、9月9日に児童文化センターに贈呈した(図15)。



図15 米子市児童文化センターでの贈呈式



図16 米子市児童文化センターでの分光観測実習



図17 米子市児童文化センターでの波長較正実習

4.2 米子市児童文化センターでの波長校正実習の実施

さじアストロパークは研究員の方全員が天文学の専門家であるが、米子市児童文化センターは一部の職員の方以外は天文学の専門の方ではない。

そこで、贈呈式の後米子市児童文化センターの 15cm 屈折望遠鏡で分光観測実習を行い (図 16)、2024 年 10 月 2 日にそのデータを用いて波長校正実習を行った (図 17)。このようにして、実際に天体分光観測に使っていただけよう配慮した。

5. まとめ

米子高専科学部は、天体観測用分光器に波長校正光源の光を入射させる装置「波長校正ユニット」を新しく開発し、2024 年 9 月にさじアストロパークと米子市児童文化センターへ寄贈した。さらに、米子市児童文化センターでは職員の方を対象とした分光観測実習と波長校正実習も行った。

本ユニットは既製品の光路切換装置に望遠鏡の接続リングを組合せるだけで非常に簡単に製作できる。さらに、サトーパーツ製のパイロットランプ (Ne-Xe ランプ) を波長校正光源としたことにより、既製品の波長校正ユニットが 10~25 万円程度と高額であるのに対し、本ユニットは 2 万 6 千円と極めて安価に製作できる。その上、すでに複数の高校天文部が保有している昭和機械製作所製の VEGA 等の既製の分光器にも接続できるよう工夫した。

本ユニットを用いると、天体分光観測の際の波長校正光源の撮像とフラット光源の撮像が非常に簡単に行える。そのため本ユニットは分光観測を行う上で非常に強力なツールになると考えている。そこで、本ユニットの製作・使用方法は近日中に米子高専 HP に掲載する予定である。

6. 謝辞

研究を行なうにあたり、金属加工についてご指導くださった米子高専ものづくりセンターの技術職員の皆様、本企画を採択してくださった鳥取県教育委員会の選考委員の皆様にこの場をお借りしてお礼申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 小暮智一著, 現代天文学史, 2015 年, 京都大学学術出版会出版
- 2) 竹内彰継他, 2023 年, 米子高専研究報告, 第 58 号, 47-55 頁
- 3) LLP 京都虹工房ホームページ
<https://photo-cross.com/product.html>
- 4) 竹内彰継他, 2024 年, 米子高専研究報告, 第 59 号, 1-10 頁

- 5) 日本変光星研究会ホームページ

https://www.ananscience.jp/variablestar/?page_id=758

- 6) ウンゼルト著, 小平圭一訳, 現代天文学, 1978 年, 岩波出版