

太陽観測専用の小型分光器の設計，および性能評価

○永渕雄希，野澤恵（茨城大学），坂江隆志（埼玉県立浦和西高等学校），
仲谷善一（京都大学附属飛騨天文台），花岡庸一郎（国立天文台），
竹内彰継（国立米子工業高等専門学校），国立天文台先端技術センター

茨城大学・太陽研究室の取り組みの1つとして，太陽観測システムの構築がある。水戸キャンパス・理学部棟（地上4階）屋上に簡易的な観測室を設置，大学独自の太陽観測に向けた研究として取り組んでいる。図1は観測室の外観である。



図1 観測室

取り組みの例として自動観測システムの構築がある。2年前から本格的に始められたこの研究は，観測開始となる導入から，追尾，撮像，画像処理，記録・保存，データ公開，観測終了までを全自動で行うことを最終目標としており，昨年までに，自動で最大3時間，太陽を追尾し，撮像，記録するシステムを構築した [1]。今年はさらに画像処理に必要なフラットフレーム，ダークフレームの自動取得を可能にする機構の増築に挑戦中である。

他に小型分光器の製作にも挑戦しており，ここではこの研究についての進捗状況を報告する。

1. 先行研究

埼玉県立浦和西高等学校の物理教員である坂江氏が，小型軽量で，高校の授業で眼視観測可能な太陽分光器を製作した。図2はその外観である。授業での使用は勿論，天文部による活用や，坂江氏本人による解析や物理量の導出などが継続されている。例えば，分光観測により複数波長での太陽単色像の作成に成功している [2]。

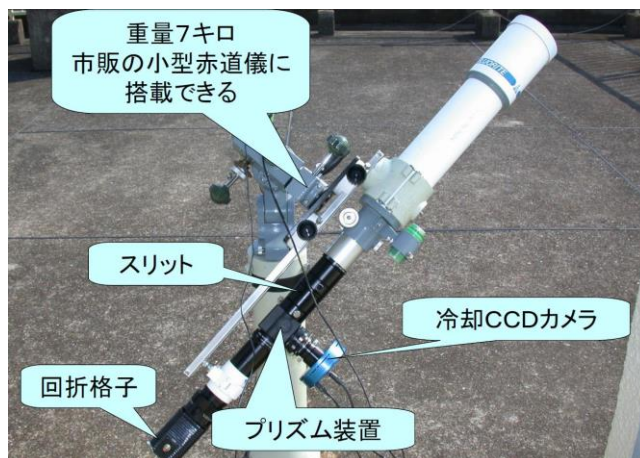


図2 坂江氏の分光器

これを受け，当研究室でも2012年より小型分光器の製作，改良，およびこれを用いた観測に挑戦している [3]。図3はその分光器の外観である。基本的に坂江氏の分光器をもとに作成し，特長としては坂江氏のものよりも小型，軽量化に成功したという点がある [4]。全長約900 mm，重量約5.8 kgである。これら

は学部生の卒業研究として3年間継続して取り組まれており，成果例の1つに自転速度の概算がある。太陽の東リムと西リムでのスペクトルから得られる暗線のドップラーシフト量を測定， $v \leq 2.3$ km/s を算出した [5]。理論値が約1.89 km/sであることから，概算に成功したといえる。

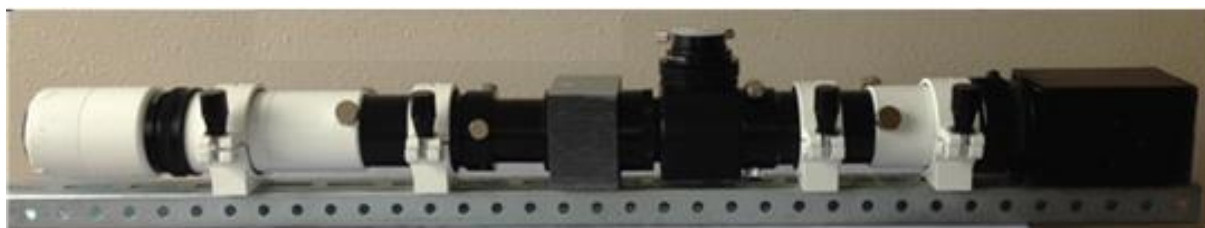


図3 当研究室の自作分光器

2. 本研究

当研究室の自作分光器は、製作当初より問題を抱えている。まず、設計図や光路図などを描かずに、手探りで汎用品を組み合わせて製作しているため、機構について理論的に厳密な言及をすることが難しい。次に、汎用品が存在しない部分は手作りであるため、迷光や、固定のガタつきなどの問題がある。従って観測時や準備の際の操作に、ある程度の慣れを必要とする。加えて手作りである分、耐久性に難があり、定常的な観測に至ってはいない [6]。

そこで当研究室としては、定常観測に耐え得る、太陽観測専用の小型分光器が必要であるため、新たに設計・製作し、定常観測に使用することを計画している。ただし設計図、光路図を用いての設計・製作は当研究室として初の試みとなるため、まずは製作した分光器自体の定量評価が必要である。以上の点から、本研究では

- ・ 定量観測に向けた小型分光器のプロトタイプ的设计
- ・ 完成後の性能評価に向けた、測定方法の確立

の2点を目標とする。以下、先行研究で製作された当研究室の分光器を自作分光器、本研究で設計する分光器を専用分光器と呼称する。

また専用分光器自体の将来的な展望としては、まず短期的な計画として、定量的な観測を行い、装置自体の信頼性を証明する。方法としては後述の性能評価法に加え、既知の太陽現象の観測を行うことも予定している。例えば太陽の周縁減光の減衰率には、波長依存性があることが知られている [7]。こういった現象を専用分光器でも充分取り扱い可能かを検証する。次に中～長期的な計画として、分光器を茨城大学太陽観測システムに組み込む。太陽観測衛星「ひので」や「Solar-C」計画などのように、太陽大気の3次元的な観測を地上からも定常的に行うことを計画している。

3. 設計

全体構造として望遠鏡、各光学素子を購入し、分光器部分を金属加工によって製作する。これらを組み合わせ、赤道儀式架台へ搭載しての観測を予定している。購入予定の望遠鏡はTOMYTEC社製『BORG77ED II』である。口径77 mm、焦点距離510 mmで、焦点面での太陽像直径は4.73 mmである。太陽全面の観測を計画しており、スリットスキャン時に

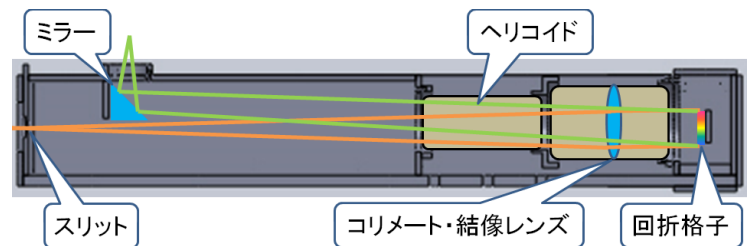


図4 設計した分光器の断面図

全面像がスリット長よりも小さいことが条件となる。スリットスキャンは赤道儀の追尾を止め、日周運動を利用して行う。製作するスリットは10 mmであり、太陽追尾の正確性の問題などから、太陽像直径を考慮する必要がある。この望遠鏡を選択した。またコリメート・結像レンズは望遠鏡に使用されているレンズと同一の製品を購入する。CCDカメラは当研究室で所有の物を使用予定である。設計した分光器部分は、基本的に板厚5~12 mmのアルミニウム (A5052) 板をネジで組み立てる。これにより製作費用・期間の大幅な削減に繋がり、また将来、部分的なカスタマイズも可能となる。しかしながら板を組み立てる構造ゆえ、隙間からの外部迷光のおそれがある。そのため内側に植毛紙を貼り付けることで隙間を塞ぎ、植毛紙自体による内部迷光の低減も図る。形状は、先行研究を踏襲したリトロ型である。図4は設計した分光器の断面図である。

さらに本研究は先行研究での問題点を無くすために機構への工夫を複数取り入れており、代表的なものとして次の3点について述べる。

1点目は本体のたわみの抑制機構である。コリメート・結像レンズの焦点距離の調整のためヘリコイドを組み込むことで、回折格子を入れた箱（回折格子部）が前後する。前後の駆動を維持しつつ、光軸の直進性も保持しなければならない。そこで回折格子部を2面の長い板に沿って前後させることで、光軸のたわみを抑制する。図5は回折格子部が2面の長い板に沿って前後する駆動のイメージである。また本体であるヘリコイド以外に、MISUMI社製スライドレールを2本組み込み、3点で支えることで耐久性の向上に寄与する。さらに2面の長い板自体がたわまないように、最後方に板を取り付ける。

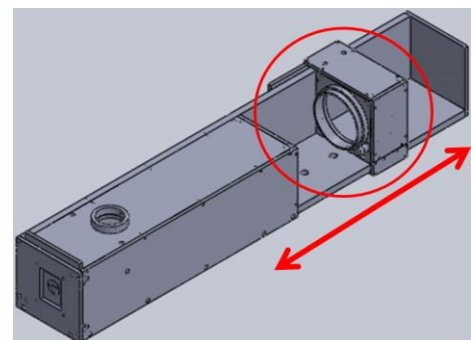


図5 回折格子部の駆動イメージ

2点目は入射光・反射光の光軸への考慮である。先行研究として、まず坂江氏の分光器は、光軸が各レンズの中心を斜めに通過している。次に自作分光器はレンズ下部を直進している。理想はレンズ中心を直進するのが良いが、リトロ型であるがゆえに必ず光路をどこかで曲げる必要があるため、実現は難しい。そのため両者のバランスを取る必要があるが、本研究では光路図の設計を行うことで先行研究より最も理想に近い状態を可能とした。特に入射光は望遠鏡のレンズ中心を直進し、コリメート・結像レンズの中心から4.5 mm下方を直進する。口径が77 mmであることから、レンズ半径に対し中心から約5.8%程度のズレであり、ほぼ誤差と見積もっている。

3点目はスリットビューワーの組み込みである。望遠鏡での集光により焦点面にできる太陽像の、どこにスリットを当てているのか、自作分光器では確認しながら同時に観測することができなかった。そのため、スリット面をミラー仕様にし、確認する機構を組み込む予定である。これをスリットビューワーと呼んでおり、国立米子工業高等専門学校の竹内氏がVixen製フリップミラーを改造し成功している [8]。図6はスリットビューワーの機構のイメージである。これを1つ当研究室に送ってくださっており、専用分光器に組み込む予定である。

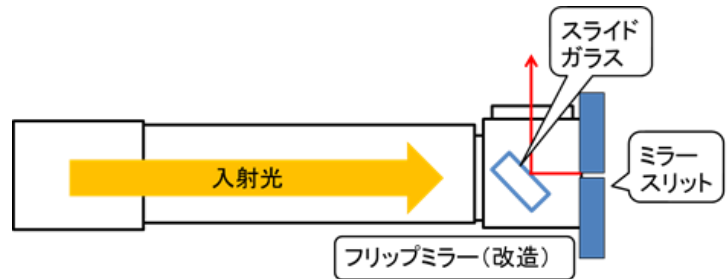


図6 スリットビューワーのイメージ

設計後の製作を当研究室で独自に実施するのは現状、困難である。そのため製作を国立天文台・先端技術センターへ依頼している。2015年度の共同利用が採択されており、またこれまで当研究室になかった技術的な知識やノウハウも教授されている。

設計後の製作を当研究室で独自に実施するのは現状、困難である。そのため製作を国立天文台・先端技術センターへ依頼している。2015年度の共同利用が採択されており、またこれまで当研究室になかった技術的な知識やノウハウも教授されている。

4. 性能評価

完成した専用分光器には性能評価が必要である。自作分光器で行われてきた評価法を見直し、厳密な手法を確立することも計画しており、本研究では特に次の3点に対する性能評価法の確立を目指す。

1点目は波長分解能である。自作分光器ではレイリーの基準を参考にしている。太陽観測により取得したH α 線 (6562.8 Å) 付近の輝度プロファイルを表示し、その中で最も近接した暗線を目視で探し、Fe I (6496.5 Å) とBa II (6497 Å) の暗線が確認できたことから $\Delta\lambda=0.5\text{\AA}$ としている。図7は、実際に使用されたプロファイルによる測定方法を表している。しかしながら目視評価は信頼性に欠ける手法である。本研究では半値全幅を利用した分解能の測定を計画している。暗室実験により単波長のレーザー光を導入し、輝線の半値幅を測定する。これにより従来よりも遥かに信頼性の高いデータの取得が可能となる。ただしこの方法で現在、実験を繰り返しているが輝線が正規分布のプロファイルを描かない問題がある。従って、PSF (Point Spread Function) の考慮が必要となる。

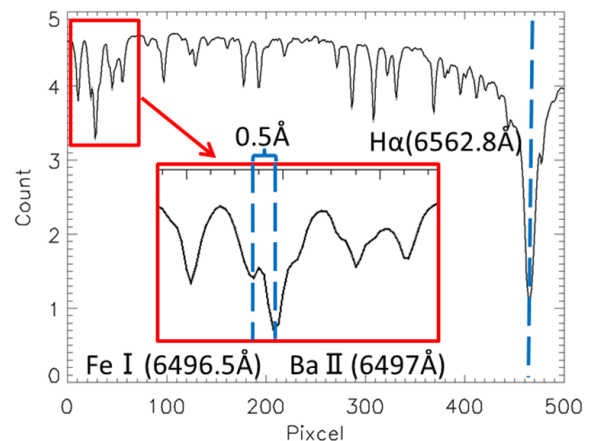


図7 自作分光器での波長分解能の評価方法

そこで2点目がPSFである。自作分光器での測定は実施されていない。波長分解能の手法と同様、単波長のレーザー光を導入する。ただし分光器のスリットは取り外した状態で観測し、レーザー光の広がり調べる。

3点目は迷光である。自作分光器では太陽観測により取得したプロファイルを観測データ、BASS2000に掲載の波長データをリファレンスとして迷光値を測定、8%と算出した。しかしながら地上の太陽分光観測施設での迷光への要求スケール誤差は5%であることから、さらに低減が必要である。また観測データの取得時に、大気散乱光なども望遠鏡から分光器へ導入されている可能性が十分に考えられる。本研究では室内実験により内部迷光、外部迷光に対しそれぞれのアプローチを計画している。まず内部迷光は、暗室にて単波長のレーザー光を導入し、輝線以外で輝度が検出さ

れば迷光となる。但しこれは2種類の単波長で調べる必要がある。次に外部迷光は、単波長のレーザー光を導入し、分光器の周囲から連続光を照射、輝度が検出されれば迷光となる。

5. まとめ

現在、茨城大学・太陽研究室では太陽の観測システムの構築に挑戦している。中でも分光観測においては、将来的な定常観測を目指し、定量観測に向けた専用の小型分光器のプロトタイプ製作に挑戦している。設計における主要な特長としては

- ・駆動部による全体の光軸のたわみの抑制機構
- ・入射光・反射光の光軸に対する考慮
- ・スリットビューワーの組み込み

などがある。また性能評価法の確立に対する計画を進めており、本研究では

- ・半値幅を利用した波長分解能の測定
- ・PSFの測定
- ・単波長の光を利用した迷光値の測定

について計画中である。

6. 参考文献

- [1] 須藤謙人, 2014年度, 茨城大学卒業論文『汎用品を用いた太陽観測システムの自動化』
- [2] 坂江隆志, 2012, 東レ理科教育賞「太陽観測用小型軽量高分散高分解能分光器の製作と応用」
- [3] 岩間香苗, 平山絵理, 2012年度, 茨城大学卒業論文『太陽観測用分光器の製作と観測への応用』
- [4] 海老澤なつみ, 2013年度, 茨城大学卒業論文『太陽観測用分光器の改良と性能評価』
- [5] 西田侑衣子, 2013年度, 茨城大学卒業論文『太陽観測用分光器の改良と画像解析』
- [6] 関根由美香, 2014年度, 茨城大学卒業論文『自作分光器の改良と黒点温度導出』
- [7] Pierce & Waddell 1961, Mem. Roy. Astron. Soc., 63, 89
- [8] 竹内彰継, 山脇貴士, 2014, 天文教育, 9, 4