流星分光観測装置「RAKUSEI」の製作と立川 HRO の構築

～ビデオと電波を用いた流星群の分析～

東京都立立川高等学校

1 年　田中蔵之介　髙橋大佑　中嶋秀利　林道遥嵩　2 年　荻島侑大　大浪弘貴

1. 要旨

本校天文気象部では、1953 年からペルセウス座流星群の徹夜観測を続けており、現在はふたご座流星群の徹夜観測も行っている。そこで、特定の流星群の極大日だけではなく毎日の観測を可能にするため、本校天文気象部では安価な防犯カメラによる自動観測と電波観測を組み合わせた（水澤ほか 2023[1],2024[2]）。本研究では、流星の母天体となる彗星・小惑星のより具体的な分析を可能にするため、回折格子を取り付けたカメラモジュールを Raspberry Pi で制御する流星分光観測装置を新たに製作した。また、正確な観測データの取得には必要な補正計算を一元化した Python プログラムの開発を開始した。さらに、電波観測から流星の軌道特定に繋げるために、本校から電波の発信を開始した。

2. 研究背景

流星とは、惑星間空間に存在する流星物質が地球大気圏に突入し発光する現象である。流星体が約 11.2～72km/s（書籍　流星 I より）で突入し、断熱圧縮により高温、励起状態となり、基底状態に戻る際にエネルギーが光として放出され発光する。流星物質は主に彗星由来のものと微惑星・小惑星由来のものに分けられる。その彗星などの母天体から放出され、母天体の軌道に沿って分布した塵の集団をダストトレイルという。これを地球が通過する際に普段より多くの流星が観測され、この現象を流星群という（図 1）。

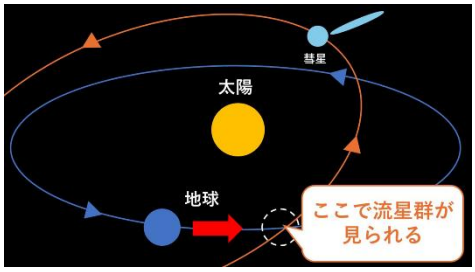


図 1 流星群発生の仕組み

本校天文気象部では 1953 年からペルセウス座流星群の徹夜観測を行っており、現在はふたご座流星群の眼視観測も行っている。また、常時流星を観測するため、ATOMCam2 を用いたビデオ撮影と、アマチュア無線の電波による 2 手法での自動観測も行っている(水澤ほか 2023[1],2024[2])。ビデオ観測では複数地点の観測から流星の対地経路や速度、日心軌道が求められる。このようにして流星物質が宇宙空間のどこからやってきたのかを調べることができる。電波観測では他局から発信された電波が、流星が流れたときに発生する電離柱に反射したものを受信することで流星を観測することができる。電波観測は天候、町明かりなどに左右されないため流星群などのデータ集計を行う際、より正確に行うことができる。また、東村山 HRO からの引継ぎも兼ねて、本校に立川 HRO を構築し電波発信をすることで、他の受信局のより継続的な観測に役立たせる。

また、流星発生時に流星体は流星体に含まれる元素に応じて決まった波長の光を発する。これにより、回折格子を用いて流星を分光観測することで、流星物質の組成を調べることができる。これは、間接的に母天体の彗星や小惑星を観測することに繋がる。また、流星の発光成分には大気によるものも含まれるため、これは地球の高層大気を観測することにも繋がる。

3. 研究目的

流星分光観測システムを構築して流星の成分を明らかにし、母天体の彗星・小惑星の観測に繋げることを目指す。また、電波観測に用いるアマチュア無線を受信するのみでなく、発信用のアンテナを設置し、本校屋上からのアマチュア無線発信及び他の受信局に観測してもらうことを目指す。

4. 先行研究

本研究は 2023 年より行われている流星観測の自動化（水澤ほか 2023[1],2024[2]）の研究の継続も行う。

先行研究 1 ビデオ観測システムの構築

(i)方法

約 4000 円と安価ながら高感度な赤外線ナイトビジョンを搭載している防犯カメラATOMCam2 を 4 方位と天頂方向の計 5 台設置し、全天を網羅した（図 2)。さらに有線で部室の NAS にデータを送信し、いつでも録画データを確認できるようにした。また、日中の強い日差しからカメラを守るため、スマホから遠隔で開閉が可能な自動日除け装置を開発した。(水澤ほか 2023[1],2024[2])



図 2　ビデオ観測装置(水澤ほか 2023[1],2024[2])

先行研究 2 ビデオ観測における経路特定支援ソフトの開発

ATOMCam2 の映像から流星の経路特定を行うには既存の経路特定用ソフトである UFOOrbitV2 の外部入力形式の R90 形式に対応した CSV を作成する必要があるため、GUI ソフトを開発した。GUI ソフトで図 3 の手順を踏み、UFOOrbitV2 を用いることで経路特定を行うことができる(水澤ほか 2024[2])。



図 3 経路特定支援ソフト(水澤ら 2024[2])

先行研究 3 電波観測システムの構築

素子の八木アンテナを同軸ケーブルと分配器を用いて 2 台のパソコンに接続し、大津(53.372MHz)と豊川(53.100MHz)から送信されている電波を受信した(図 4)。MROFFT を用いて 10 分ごとに受信画面を画像化し、自動でパソコンに保存できるようにした。加えて、観測されたヘッドエコーから流星の経路を特定するための独自の手法を考案した(西ほか 2024[2])。



図 4 電波観測システム(水澤ほか 2023[1],2024[2])

5. 分光観測装置および分析ソフトの開発

本研究では、上記の先行研究に加えて流星の分光観測を行うための観測装置を製作した。

Ⅰ. 観測装置の製作

分光観測に使用するカメラは、安価ながら高感度耐性の強い、「IMX462」の Raspberry Pi カメラモジュールを用い、レンズは焦点距離 8mm,F 値 1.8 のレンズを使用することとした。本研究では、カメラモジュールに付属している IR カットフィルター（赤外線をカットするフィルター）を取り外し、可視光線及び赤外線で観測を行う。また、水澤らによる先行研究（水澤ほか[1]）（水澤ほか[2]）にて用いていた、ATOMCam2 も 1 台用いて分光観測を行っている。なお、回折格子は Edmund Optics 社の透過型ブレーズド回折格子を用いている。

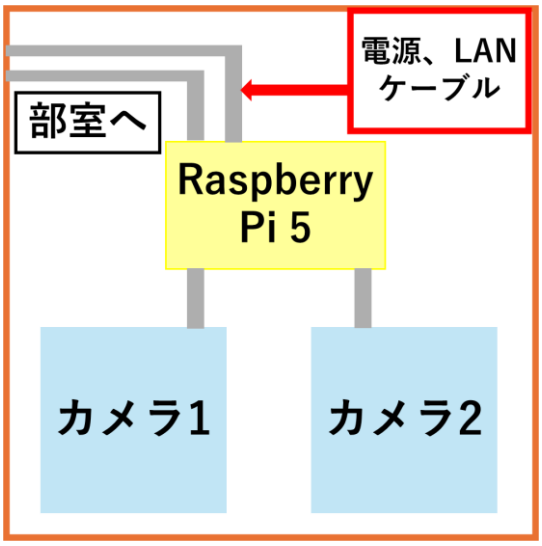


図 5 観測装置の設計図

(i)使用する材料

・Raspberry Pi5 8GB　・ATOMCam2
・IMX462 カメラモジュール　・M12 マウントレンズ
・LAN ケーブル　・電源ケーブル　・机　・段ボール
・養生テープ　・透明アクリル半球
・透過型ブレーズド回折格子

カメラ	IMX462	AtomCam2
レンズ	8mm f1.8	2.8mm f1.6
画角	約39° ×22°	約102° ×55°
撮影画質	FHD 60fps	FHD 15 fps
回折格子	透過型ブレーズド格子 VI5 600GPM 25 x 25	透過型ブレーズド格子 VIS600GPM 25 x 25

表 1 装置に用いた機材の詳細

(ⅱ)設置方法

① 屋上の机に使用する ATOMCam2、IMX462 カメラモジュール、制御用の Raspberry Pi5 を置き、磁石及び養生テープで固定。
② 水澤らにより制作された(1)(2)の物置の中から LAN ケーブル及び電源ケーブルを引いてくる。
③ カメラを囲うように、防水用の透明アクリル半球を机の上に設置する。



図 6 流星分光観測装置「RAKUSEI」

Ⅱ. 分析手法及び画像補正ソフトの開発

流星の分光観測の分析は図 7 のような手順で行うが、正確にスペクトルのデータを取得するためには黄色部の補正作業を行う必要がある。これらの処理を全てフリーソフトで行おうとすると、手順が多く煩雑になり、分析が困難になる。そこで、この補正作業を一元化して自動で行うソフトを Python を用いて開発することを目指した(図 8)。現在、スカイ減算、ダーク減算、ATOMCam2 の歪み補正の機能は実装できており、今後全ての補正機能の実装を目指す。

画像補正を行った後は RSpec という分光観測画像から輝線スペクトルを抽出する解析ソフトを用いて元素同定を行った(図 9)。

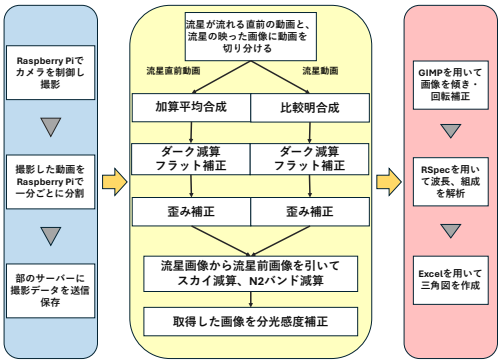


図 7 分析の手順

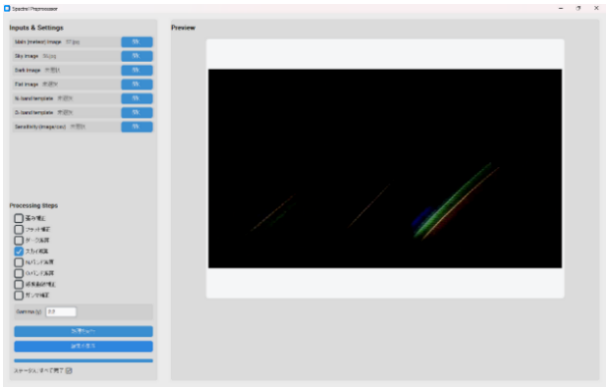


図 8 画像補正ソフト

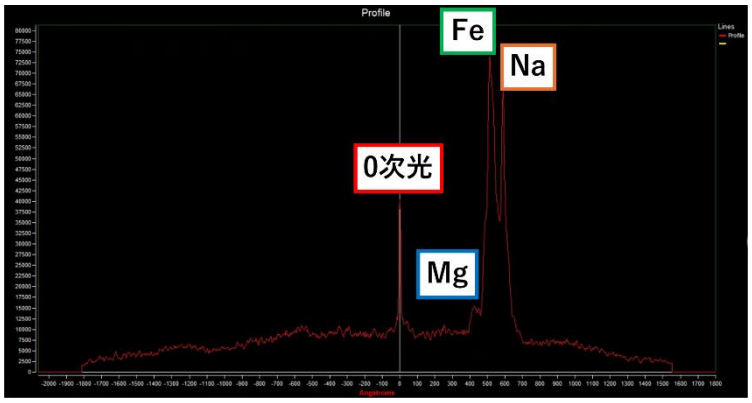


図 9 Rspec での解析画面

Ⅲ. おうし座南流星群の観測結果

11 月の 3 日の夜から 8 日の朝にかけてカメラをそれぞれ北東(ATOMCam2)、北西(IMX462)へ向け観測を行った。計 4 つの流星を捉え、分光することに成功した。下の写真は実際に ATOMCam2 で撮影した動画を比較明合成し、歪み補正、スカイ減算を施したものである(図 10)。捉えた 4 つの流星について、Sonataco.jp のデータから UFOOrbitV2 を用いて経路を特定したところ、それぞれエリダヌス座 σ 流星群、おうし座南流星群、おうし座北流星群、もう一つは散在流星であることがわかった。また、それぞれの流星の金属組成(マグネシウム、鉄、ナトリウム)を調べ三角グラフにプロットした(図 11)。その結果、おうし座南流星群以外の流星についてはマグネシウムの割合がとても小さいことが分かった。



図 10 実際の観測画像(ATOMCam2 で撮影歪み補正、スカイ減算済)

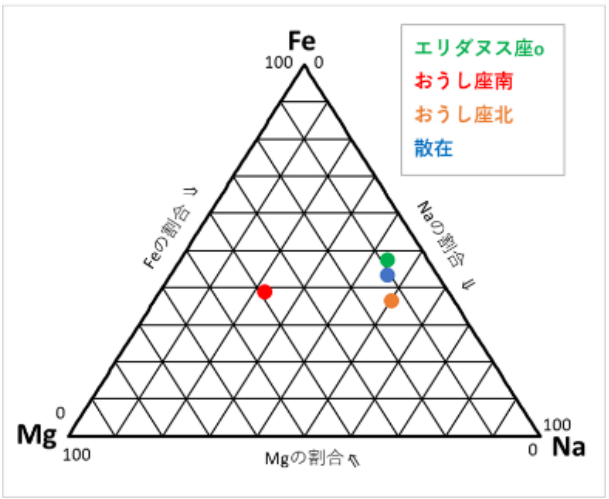


図 11 分光観測の結果

6. 立川 HRO(Ham Radio Operator)の構築

立川 HRO の構築、運営につきましては、元東村山 HRO 送信者の神作哲夫氏に機材の設置、等でご協力いただきました。

電波観測の仕組み

流星が大気中に突入すると、その飛跡に沿って空気が高温になり電離し、電子密度の高い「電離柱」が形成される。この電離柱は超短波帯(30～300MHz)の電波を反射する性質を持つ。そのため、宇宙方向に突き抜けるレーダー電波が流星発生時に電離柱で反射されることで反射波として観測される。これは流星発生時に電離柱に反射する。その反射された電波を受信することで流星の発生を検知することが可能となる。また電波観測は昼夜や天候に左右されずに継続的な観測ができるという利点がある(図 12)。

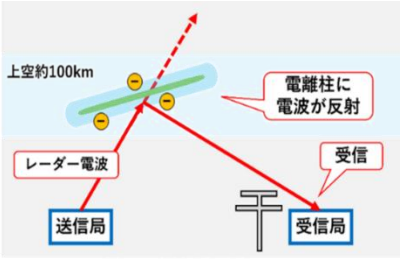


図 12 電波観測の仕組み

Ⅰ. 発信設備の構築

電波の発信には、八木アンテナ 1 本と発信機 1 台を用いた。

(i)設置方法

本校屋上に発信用八木アンテナを一本北向きに設置し、屋内に発信機を設置した(図 13)。

(ii)発信方法

周波数は、東村山 HRO からの引継ぎであるので、そこで指定されていた 52.905Hz を用いた。



図 13 発信用アンテナと発信機

Ⅱ. 結果

秋田県秋田市、福島県相馬市、静岡県駿東郡清水町、愛知県名古屋市などで受信していただくことに成功した。また、実際に相馬市などの受信局での流星の観測にも役立った(図 14)。



図 14 発信用アンテナと発信機

7. まとめ

・分光観測では、分光観測装置を作成し実際に流星を観測し、分析した。
・電波観測では、アンテナを設置し電波を発信し、多地点から受信されていることを確認した。

8. 今後の展望

分光観測システム、立川 HRO の更なる構築を目指し、以下の内容について観測・研究を進める。

・分光観測システムの撮影、及び動画のサーバーへの保存を完全自動で行えるようにする。
・補正用ソフトに導入できていない、ダーク減算、フラット補正、分光感度補正などの実装を目指す。
・現在、Raspberry Pi では 2 台以上のカメラモジュール制御はうまくできていないため、2 台以上の制御を目指す。
・分光による流星観測数が少ないため、流星群を中心に観測し、スペクトル分析を進める。
・分光観測を継続、データを蓄積し、流星群の傾向を分析する。
・分光観測により成分ごとの発光点を高度別で明らかにし、高層大気の状態を調べる。
・立川 HRO の発信を継続し、多地点から観測された流星の分析を行う。
・ヘッドエコー観測を行い、電波で得たデータから流星経路を特定し、ビデオとの流星の同定を正確に行う。

9. 謝辞

本研究は、高校・高専気象観測機器コンテストの助成金を受けて行いました。
本研究を行うにあたり、本校天文気象部顧問の可長清美先生に全体をご指導いただきました。
阿部 新助氏(日本大学 理工学部 航空宇宙工学科 教授)に、使用機器に関するご指導を頂きました。
神作哲夫氏(元東村山 HRO 送信者)に、電波観測の手法のご指導及び、アマチュア無線発信用の機材を頂き、発信にご協力頂きました。
天文気象部 OB の TA の方々に、観測機器の製作及び資料作成についてご協力頂きました。
本研究にご協力いただいた全ての皆様に感謝いたします。

10. 参考文献

1.天文気象部(2023)『流星観測装置「TenGu」の制作』「第 12 回高校・高専気象観測機器コンテスト」
2.天文気象部(2024)『流星の自動観測システム「TenGu」ver2.0 の開発』「第 13 回高校・高専気象観測機器コンテスト」
3.天文気象部(2025)『天文気象観測システムの開発～視程及び流星の自動判別と観測データの一元化～』「第 7 回中高生情報学研究コンテスト」
4.山下泰正(2002) 「天体分光学入門」流星スペクトルから何が分かるか 銀河の森天文台
5.菊池啓太(2024) ふたご座流星群ダストに含まれる揮発性 ナトリウムの経年変化
6.日本変光星研究会 永井和男(2024) 分光観測を始めよう
7.前田幸治(2020) 流星スペクトルの論文を読むにあたって ーグラフと用語解説ー 「第 2 回流星スペクトル研究集会」
8.AstroArts(2018) 星ナビ 12 月号 流星スペクトル「虹色の流星」と「流星の物理」
9.公益社団法人 日本天文学会 天文学辞典 https://astro-dic.jp/
10.谷優希(2022)低価格モノクロ高感度ビデオカメラによる 流星分光観測システムの構築
11.SA-100 分光: しどろもどろな天体観測 http://binary.cocolog-nifty.com/blog/2016/03/sa-100-b088-4.html
12.関口孝志(2019)自動観測による流星スペクトルの観測と分類 「流星スペクトル研究集会」
13.阿部新助,小川巧覧,前田幸治,荒井朋子(2020) Sodium variation in Geminid meteoroids from (3200) Phaethon
14.永井和男(2024)なるべく FreeSoft で分光解析
15.秋月電子通商 M12 マウントレンズ 標準 8mm for Pi カメラ HQ M12
https://akizukidenshi.com/catalog/g/g117973/
16.Edmond Optics jp.透過型ブレーズド回折格子
https://www.edmundoptics.jp/p/600-grooves-25mm-sq-287deg-blaze-angle-grating/10093/
17.SWITCH SCIENCE.IMX462-127 赤外線カットカメラ
https://www.switchscience.com/products/8312?srsltid=AfmBOoomY0RkL2v0UdxjTJaJMA8WKNv8A4sp0CJQ4pzkivkZXW4PdEX
18.Raspberry Pi Shop by KSY.Raspberry Pi 5 /8GB
https://raspberry-pi.ksyic.com/main/index/pdp.id/1015,1016,1062,1063,1064,1056,1057,1058/pdp.open/1016/
19.ATOM 公式ストア.ATOM Cam 2(アトムカム ツー)-完全防水・防塵＋カラーナイトビジョン.
https://www.atomtech.co.jp/products/atomcam2?srsltid=AfmBOopMJuGBTxgUSiFryMsRngS4OJNHNXJZWwZddq_z7FI8f-8pHFJS
20.斎藤馨児・長沢工(1984) 「流星 I 観測の実際」 恒星社厚生閣
21.斎藤馨児・長沢工(1984) 「流星 II 解析と理論」 恒星社厚生閣
22.画像処理とガンマ補正とコントラスト強調/低減を理解する
https://qiita.com/jtnutrient/items/26f328fb0a3a0404a13a
23.加算平均合成で画像のノイズを減らす-naikon 開発忘備録
https://kuranabe.hatenablog.com/entry/2020/10/12/000000
24.UFOOrbitV2 https://sonotaco.com/soft/index.html#ufocv2
25.Sonataco.com
https://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=6073&start=0&postdays=0&postorder=asc&highlight=
26.Astrometry.net https://nova.astrometry.net/
27.流星電波観測国際プロジェクト https://jpn.iprmo.org/
28.流星電波観測集計センターのトップページ https://www5f.biglobe.ne.jp/~hro/
29.HDSDR Homepage https://www.hdsdr.de/
30.MROFFT-Nap https://www.nap.jp/michi/meteor/mrofft/index.html