

流星観測装置「TenGu」の制作

～ビデオと電波による流星自動観測システムの構築～

東京都立立川高等学校 天文気象部

1 年 大谷勇人 奥出理人 西梨杏 沼邊龍樹 水澤資人 村田圭総

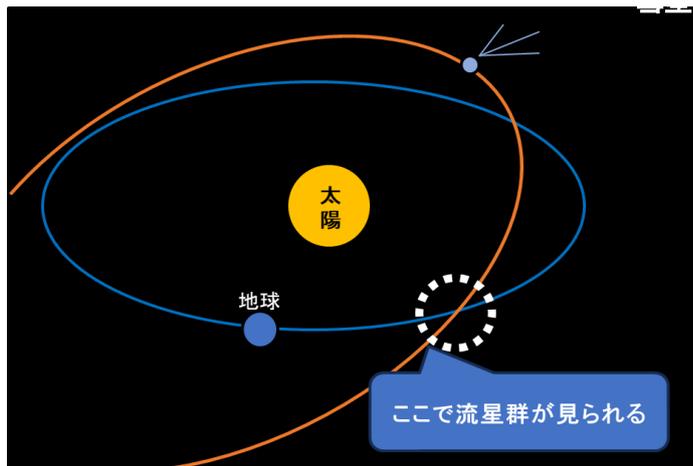


要旨

本校天文気象部では、1953 年からペルセウス座流星群の眼視観測を開始し、2011 年からは長野県の入笠山山頂付近（標高約 1800m）でペルセウス座流星群を、本校屋上でふたご座流星群の流星観測を行ってきた。現在も続く観測活動の中で、我々が徹夜で眼視観測を行う日以外にも流星観測を実施したいと考え、ビデオ観測と電波観測を合わせた新たな観測手法の開発をめざした。この観測機器により、流星群の極大前後の日も含めた、無人での長期的な観測や、今まで観測できなかった流星群の観測も試みた。また、膨大な動画データや電波のノイズ画像から、流星を自動で判別するためのプログラム開発や、リアルタイムでの流星検知システムの構築に取り組んだ。



1. はじめに



流星群とは、彗星から吹き出した塵（ダスト）の流れであるダストトレイルを地球が通過する際に起こる現象で、普段よりも流星が多く見られる。
流星観測は1時間毎に計数や明るさ（等級）、位置、流星の性質など記録し、データはダストトレイルの解明などに生かされる。

図1 流星群の仕組み

本校天文気象部は、1953年からペルセウス座流星群の眼視観測を開始し、2011年からは長野県の入笠山付近（標高約1800m）で8月のペルセウス座流星群、本校屋上で12月ふたご座流星群の観測を行ってきた。ペルセウス座流星群は合宿日程の3晩、ふたご座流星群では1晩の徹夜観測を行っている。眼視観測は、日本流星研究会が推奨する方法で、部員が4方向の空を眺め、雲量や最微光星（観測者が見える最も暗い星の等級）を確認しながら、夜明けまで1時間交替で流星を計測・記録してきた。

我々は、流星群が最も多く流れる極大日だけでなく、前後の数日間も測定してその傾向を知りたいが、徹夜観測を増やすのは難しい。そこで、本研究では無人で観測データを得るために、感度の高いビデオカメラによる撮影とHRO電波による観測の2つの手法を用いて、自動観測システムを構築することをめざし、研究を開始した。

これにより極大日前後の観測も行い、今までより長い期間で流星数の増減の傾向を掴むことや、これまで観測できなかった流星群の観測を目指した。また、膨大な動画データや電波のノイズ画像から、流星を自動で判別するためのプログラム開発や、リアルタイムでの流星検知システムの構築に取り組んだ。

ビデオ観測装置の製作は6月から開始し、今年8月のペルセウス座流星群観測では合宿先で観測装置を設置して試行した。今年は部員が90名に増えたため、眼視観測は3チームに分けてローテーションを作り同時に計数観測を行った。電波による観測装置は9月から試行し、10月のオリオン座流星群では、学校の屋上で、眼視、ビデオ、電波の3つの手法による同時観測を行った。

眼視による観測結果の分析は、近年で流星数が多く観測された2013年、2018年と、今年のペルセウス座流星群を本部とNMS（日本流星研究会）のデータを用いて、比較を行った。

また、ペルセウス座流星群のデータから、眼視観測とビデオ観測の結果について、オリオン座流星群のデータから、眼視観測・ビデオ観測・電波観測の比較を行い、それぞれの観測手法の特徴を探った。

2. 目的

- ・ 無人で流星群を自動観測するために、ビデオカメラによる観測装置と電波観測による装置を開発し、検知プログラムを作成する。
- ・ 2つの手法を用いた流星の自動観測システムを構築する。
- ・ 眼視観測によるデータとビデオ装置、電波観測のデータの比較を行い、特性を捉えて、流星群の分析を総合的に行う。極大前後の群流星数の変化の記録や新たな流星群の記録を目指す。

3. 眼視による流星観測

本部は、2011年から入笠山にてペルセウス座流星群の3晩の観測を毎年行っており、眼視の観測データ（図2）が豊富である。（2020年～2021年はCOVID-19感染拡大の影響で中止 2021年は学校屋上で実施）

今年のペルセウス座流星群は、4年ぶりに合宿の形で実施した。3地点でそれぞれ東西南北4人に分かれ（図3）、オリオン座流星群は北を除いた東西南3人に分かれ観測を行った。尚、オリオン座流星群の観測を3人で行ったのは人数の都合によるものである。そして、ビデオ観測、電波観測の結果と比較するために、HR(1時間当たりの流星数)を出した。

※考慮すべき点として、天文気象部員は流星観測に関して初心者であり、散在流星も一定数カウントしている可能性があることと、観測地の入笠山では南側に山があるため雲量となってしまうことが挙げられる。

流星観測記録用紙 (No. 1)															
年	日付	対象流星群	場所	経緯	観測時間										
2023	8/12	ペルセウス座流星群	入笠山	北緯	開始時刻	終了時刻	記録者								
観測者	北	東	南	西	観測時間										
	00	10	20	30	40	50	観測等級	00	10	20	30	40	50	結果	
北	0	0	0	0	0	0	北	4	4	4	4	4	4	平均流星数	
東	1	1	1	1	1	1	東	4	4	4	4	4	4	平均観測等級	
南	1	1	1	1	1	1	南	4	4	4	4	4	4	流星数	
西	1	1	1	1	1	1	西	4	4	4	4	4	4	散在流星数	
No.	出現時刻	北	東	南	西	方位(8方位表記)	仰角	等級	個	散在	備考				
1	24:01:31				○	南→北	20	2	X	○					
2	24:02:15			○		北→南	40	1	X	Y					
3	24:03:59				○	東→西	30	2	X	X					
4	24:08:36				○	東→西	30	2	X	X					
5	24:10:24			○		北東→南西	30	2	X	X					
6	24:12:12			○		東→西	40	2	X	X					
7	24:13:42	○				→	50	2		○	静止				
8	24:14:59			○		北→南	40	1	○	X					
9	24:15:19				○	北→西	30	2	X	X					
10	24:15:29				○	北東→南西	60	1	X	X					
11	24:19:00	○				東→西	20	2	X	X					
12	24:19:34			○		北→南	30	2	○	X					
13	24:22:30			○		北東→南西	15	2	X	X					
14	24:24:30			○		北東→南西	30	3	X	X					
15	12:25:29			○		南→北	20	1	X	X					
16	12:25:31			○		南→北	75	3	X	X					
17	24:27:45			○		北→東	10	1	○	X					
18	24:28:05			○		南→北	70	3	X	Y					
19	24:28:42			○		北東→南西	30	3	X	X					
20	24:28:19			○		北東→南西	20	2	X	○					

図2 眼視観測記録用紙



図3 合宿での眼視観測の様子
(露出をあげる加工をしたため明るい)

4. 流星のビデオ観測装置の制作とプログラム開発

I. 研究手法

ビデオ観測に使用するカメラは、約 4000 円と安価ながら感度の高い赤外線ナイトビジョンを搭載する防犯カメラ ATOMCam2 (図 4) を、4 方位と天頂方向に向けて 5 台設置し、全天の動画を撮影できるようにした。このカメラは非常に感度が高く、可視と赤外モードがあるために星や流星が写りやすいとの話を聞いたことから、このような装置の開発を思いついた。まず最初に、撮影動画からフレーム間での白ピクセル数の増加を読み取り、流星を判別することができるプログラムを作成し、システムの開発を行った。

図 4 ATOMCam2



表 1 使用した ATOMCam2 の仕様³⁾

製品名	ATOM Cam 2 (アトムカム ツー)
高さ	52mm
幅	50mm
奥行き	58mm
重量	100g
解像度	1920 X 1080 (1080p)
F値	F1.6
焦点距離	2.8mm
イメージセンサー	1/2.9" CMOS
画角	120°
ビデオ	H.264(昼モード：20 FPS、夜モード：15 FPS)
ローカルストレージ	microSDカード(8GB, 16GB, 32GB)FAT32
データ使用量	SD画質：1~4MB/分、HD画質：4~8MB/分
Wi-Fi	802.11 b/g/n 2.4GHz
動作温度	-20°C~55°C
耐候性	室内/室外対応 (防水 IP67)

II. 観測装置の制作

(i) 材料

〈カメラとその周辺機器〉

・ ATOMCam2 × 5 ・ 延長コード ・ LAN ケーブル ・ Wi-Fi 中継機 ・ 防水ケース

〈カメラ固定用の台〉

・ ラック ・ 木板 ・ 木棒 ・ 透明アクリル半球 ・ 磁石 ・マジックテープ ・ 両面テープ (クッション式) ・ 黒いビニールテープ

(ii) 制作過程

〈試作モデル〉 (図 5)

- ① 机にカメラ 4 台を東西南北の方向に向けて取り付け。養生テープで固定する。
- ② ①のように設置したカメラの中央部に、天頂向きカメラ 1 台を取り付ける。周りのカメラが視界の邪魔にならないように、木片で底上げする。
- ③ 延長コードなどを防水袋に入れて、机の下に収納。
- ④ 机の中にぶれ対策としておもりを入れる。

試作モデルでは、以下のような問題が起こった。

- ・ 夜中に降水した際、機械に影響を及ぼす可能性がある (ATOMCam2 は IP67 の完全防水だが、汚れ等が付着すると毎回拭く必要があるので手間がかかる)。
- ・ 防水袋が完全な防水でなかったため、雨水が少し袋内に入ってしまった。
- ・ 屋上が完全に平らではないため、ぶれが生じた。



図5 試作モデル (7月)



<改良版>



図6 改良版の観測装置 (11月)

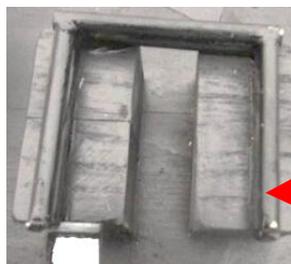
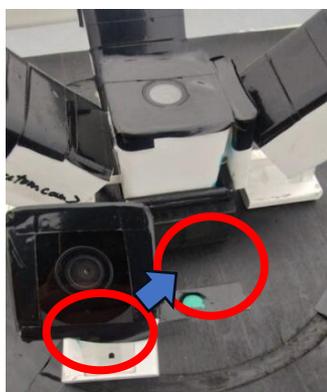
試作モデルでは主に雨水による浸水と風によるぶれの問題があった。そのため、雨水については透明半球とボックス型防水ケースで対策した。カメラは、それぞれ磁石1個で固定した(図7)。



図7 カメラをとりつける磁石

カメラの底面に内蔵された磁石と
板に取り付けた磁石で固定

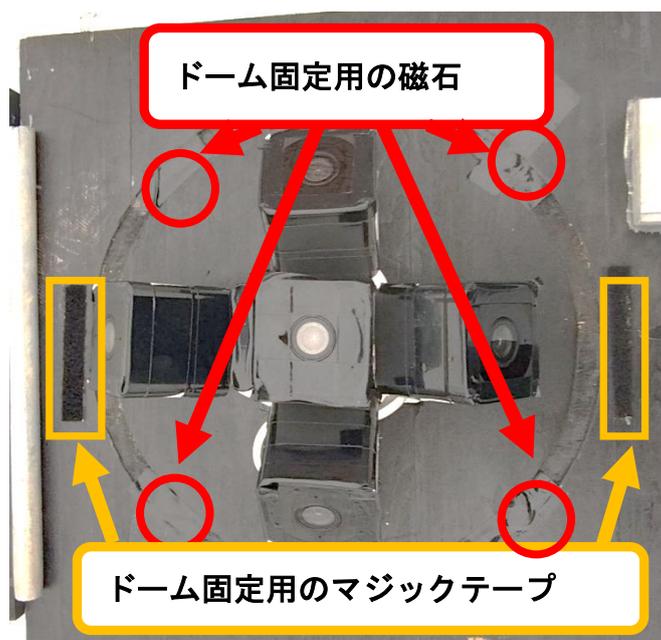
天頂方向のカメラについては、電源コードに干渉しないようにした。また、カメラを底上げして固定できるようにした(図8)。



カメラ
(天)

図8 天頂のカメラを取り付ける台

透明半球は、磁石4個とマジックテープ2つで固定し、取り外しを容易にした。また、台やカメラ表面から



の光の反射によるノイズを防ぐため、カメラ頭部と台を黒く塗装した(図9)。

図9 透明半球を外して上から見た状態

ぶれ対策については、ラックに交差させた斜めの棒（図 10）や耐震マットを取り付けることで、地震対策と同じ仕組みでぶれを防止した。そして、自作クランプの取り付けでカメラ台の直接的なぶれを防止した（図 11）。



図 10 ぶれ対策として交差させた棒



図 11 固定用の自作クランプ

電源系については、板と防水ケースに穴を開けて 5 台分の電源コードを通せるようにした。防水ケースに開けた穴については、雨水が入らないよう、クリアファイルを切り抜いたものをコードに密着するようにケースの内側に貼り付けた（図 12）。



図 12 防水ケース

Ⅲ. 流星検知プログラムの開発

ビデオ観測を行ったペルセウス座流星群とオリオン座流星群の観測では、カメラに保存される 1 分の動画を比較明合成し、比較明合成画像と元動画から目視で流星の判別を行ったが、目視による膨大なデータの確認が必要となった。このことから、Python で自動流星判別プログラムの開発を目指した。

(i) 先行研究

原口美悠は (2021) は、卒業論文『流星自動検出パイプラインの構築』において、

防犯カメラで撮影した夜空の画像から、流星を自動検出するアルゴリズムを構築し、実装した。今回構築した流星検出アルゴリズムでは、2 段階の方法で流星を抽出する。1 段目は短時間発光の抽出、2 段目は発光継続時間を用いた流星候補となる発光の抽出、である。この 2 段階の選別によって、流星による発光を他の発光 (恒星、惑星、飛行機、人工衛星、雲、etc.) と区別して抽出する。⁴⁾

としている。上記のことから、流星の検知は画像内の白ピクセル数の急激な増加により判断でき、流星と人工衛星や飛行機などの他の発光との区別は、発光の継続時間によって行えるといえる。しかし、ATOMCam2 では白ノイズが多く二値化において適切な閾値を設定しなければ、流星以外のノイズ除去ができなかったため、独自のアルゴリズムにより自動で閾値を設定し、ノイズ除去を図った。また、雲については発光継続時間では区別することができず、エッジ検出を行った際に一定面積以上あった場合、処理を飛ばすこととした。

(ii) プログラムの概要 (図 13)

制作したプログラムは以下の手順で処理を行う。

[1] FFmpeg^{※1} で 1 分間に保存される動画を 5 秒の動画に 12 分割し、画像処理を行うためのライブラリである OpenCV^{※2} で動画のフレームを保存する。

[2] 保存されたフレームを、数値計算を行うライブラリである Numpy^{※3} の maximum 関数^{※4} で比較明合成する。この処理を ThreadPoolExecutor^{※5} でマルチスレッド処理を行い、高速化した。比較明合成画像内に雲が存在すると流星と誤認知を引き起こすため、比較明合成画像からエッジ検出をし、検出した面積が決めた値より大きかった場合、フレーム内に雲が存在しているとして流星検知をスキップする。

[3] 流星は白ピクセル数の急激な増加により検知できる。そして、四分位範囲から外れ値を求め、外れ値を除いた白ピクセル数の平均が決めた値を下回るまで閾値を上げることで、ノイズを除いた二値化を自動で行う。

[4] 外れ値となった値を流星とし、白ピクセル数が多い状態が連続し、その変化量が小さい場合人工衛星と判断する。

※1 動画ファイルの編集を行うツール

※2 画像処理を行うライブラリ

※3 数値計算を行うライブラリ

※4 複数の配列の要素を比較して最大値を取得する関数

※5 複数のスレッドで処理を並行して行うためのもの

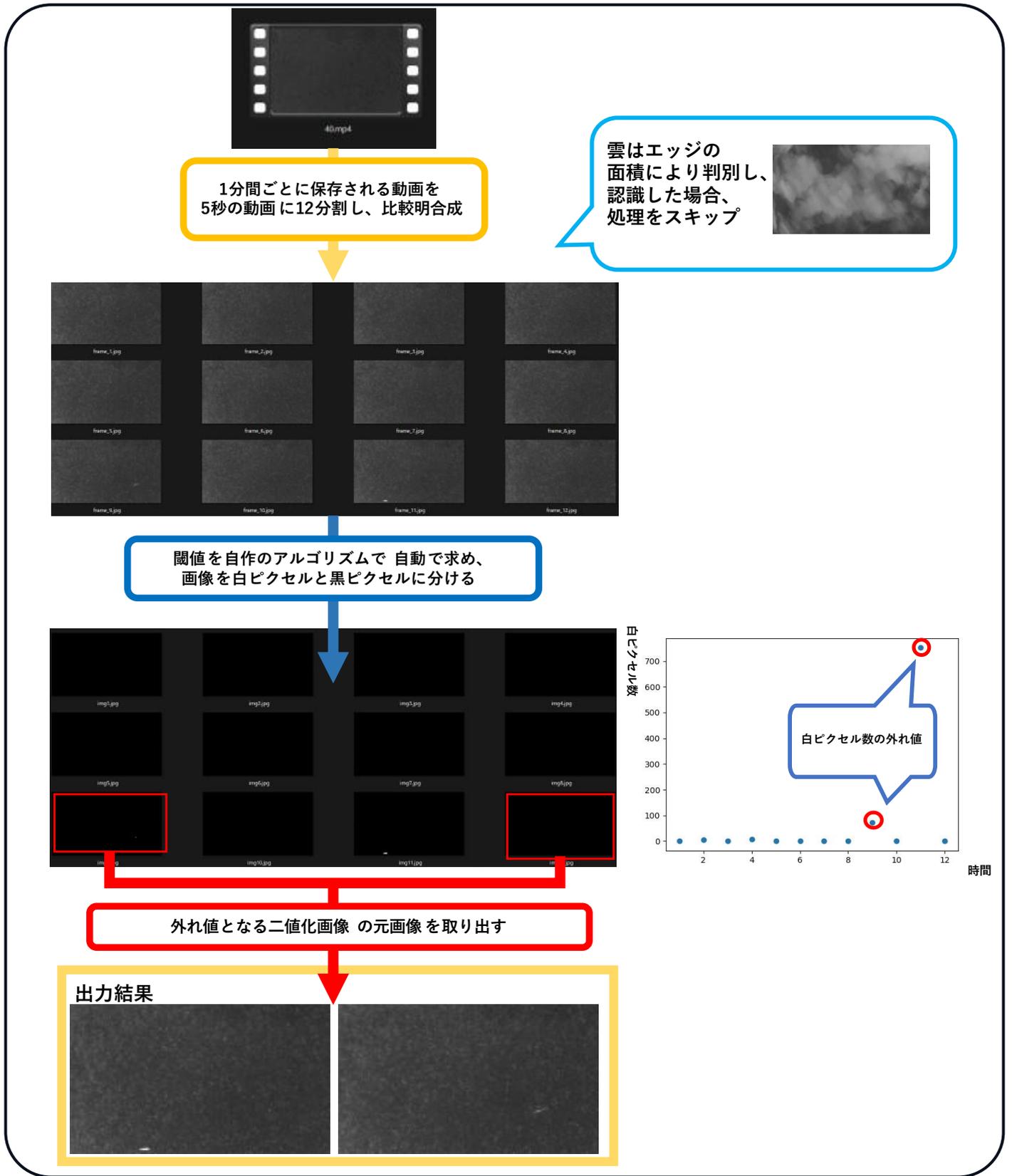


図 13 プログラムの構成図

(iii) 結果

雲が入った画像は、エッジの面積により雲を検知することができた。流星以外のノイズは閾値を上げることで除去した。流星を白ピクセル数の増加から検知した（図 14）。

しかし、発光が強く動きの速い人工衛星を誤検知してしまう例がいくつか発見された（図 15）。



図 14 検知した流星

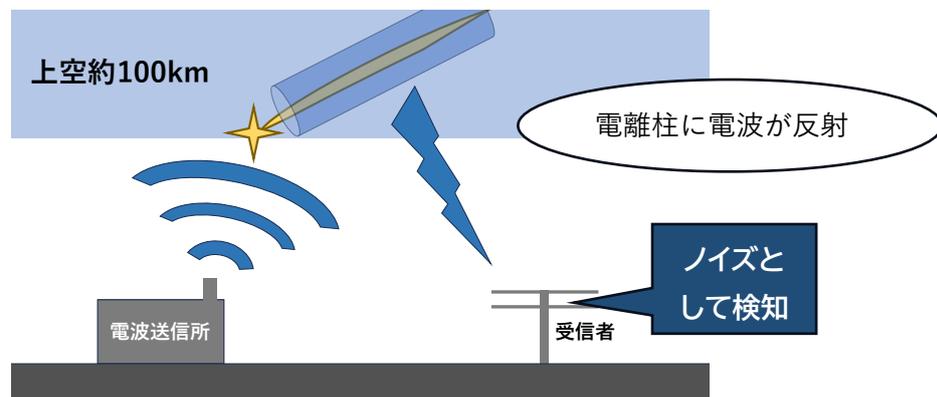


図 15 誤検知した人工衛星

(iv) 今後の方針

今のプログラムでは、流星を検知するほかに発光が強く移動速度の速い人工衛星も流星として誤検知してしまう。このことから、流星と判断する変化量の下限の調整や、1 分の動画を 12 分割より細かく分割することで、流星と人工衛星の正確な判別を試みる。

5. 流星の電波観測装置の制作・プログラム開発



I. 研究手法

図 16 電波観測の仕組み

流星の電波観測とは、流星の発生と同時に出現する「電離柱」に反射した電波を受信し流星を検知・観測すること（図 16）であり、時間や天候に左右されずに観測ができるという特徴があるため、従来から活用されてきた。

本研究では、電波の発信地点と受信地点が異なる HR0 と呼ばれる手法で行い、観測には福井県立大学アマチュア流星電波観測研究会の電波 (53.755MHz) を使うことにした。

屋上に研究用に八木アンテナを設置してケーブルを受信装置に取り付け、パソコンに接続して受信した電波を一般配布されている専用ソフトの MROFFT で画像化する。画像データを目視の判別から始め、機械学習プログラムによって流星の有無を判別するシステムの開発を目指す。

II. 観測装置の制作

(i) 使用した器具・ソフトウェア

<器具>

- ・八木アンテナ(2素子) ・同軸ケーブル ・ゴムテープ ・ビニールテープ ・PC
- ・PTL_SDR (電波を受信する dongle) ・ポール ・固定用クランプ ・ポール用ベース

<ソフトウェア>

- ・HSDR (ソフトウェアラジオ) ・MROFFT (自動観測ソフトウェア)

(ii) 装置の組み立て

まず八木アンテナをポールと固定し、次にそのポールをポールベースの上に立てた。福井県立大学アマチュア流星電波観測研究会が電波を出している方向(本校からほぼ真西)にアンテナを向け、固定用クランクでポールと屋上の柵を固定した。次に同軸ケーブルをアンテナとつなぎ、もう一方には PTL_SDR をつなげた。アンテナと同軸ケーブルの接続部分はゴムテープを巻いて防水し、ゴムテープが劣化しないように上からビニールテープを巻いた。PTL_SDR をパソコンにつなぎ HSDR を用いて電波を受信し、MROFFT で音声データを画像として記録する。



図 17 屋上に設置した八木アンテナ

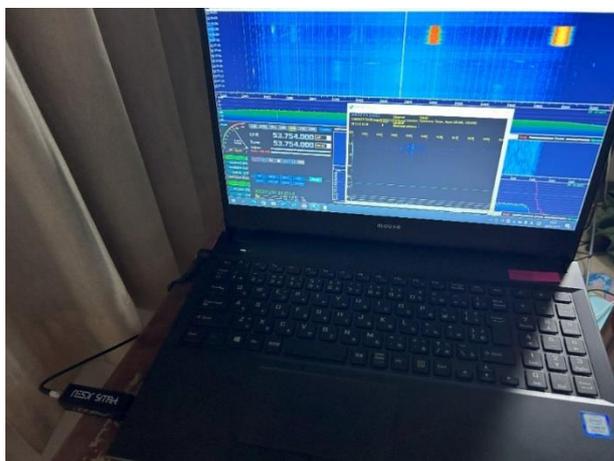


図 18 部室のパソコンと接続している PTL_SDR と同軸ケーブル

Ⅲ. 流星検知プログラムの制作

(i) 現時点での進捗

HSDR のモードを USB モード、受信周波数を 1kHz 下げた 53.754MHz に設定にすることで、流星が発生した際に反射してきた電波(53.755MHz)との差を音声に変換する。この音を MROFFT で記録し、画像を 10 分毎に保存することに成功した。

(ii) 今後の方針

Python を使用して保存した画像から流星を判断するプログラムを組む。MROFFT で 10 分毎に記録した画像を OpenCV で 1 分ごとに短冊状に切り取り、ディープラーニングさせたコンピューターに流星の有無を判断させる。流星があった画像は保存し、その時刻を CSV ファイルに記録し、1 時間ごとの流星の総数も記録する。1 時間毎にこれらを記録した CSV ファイルと流星がある画像を NAS に保存する。これらのプログラムは現在開発中である。

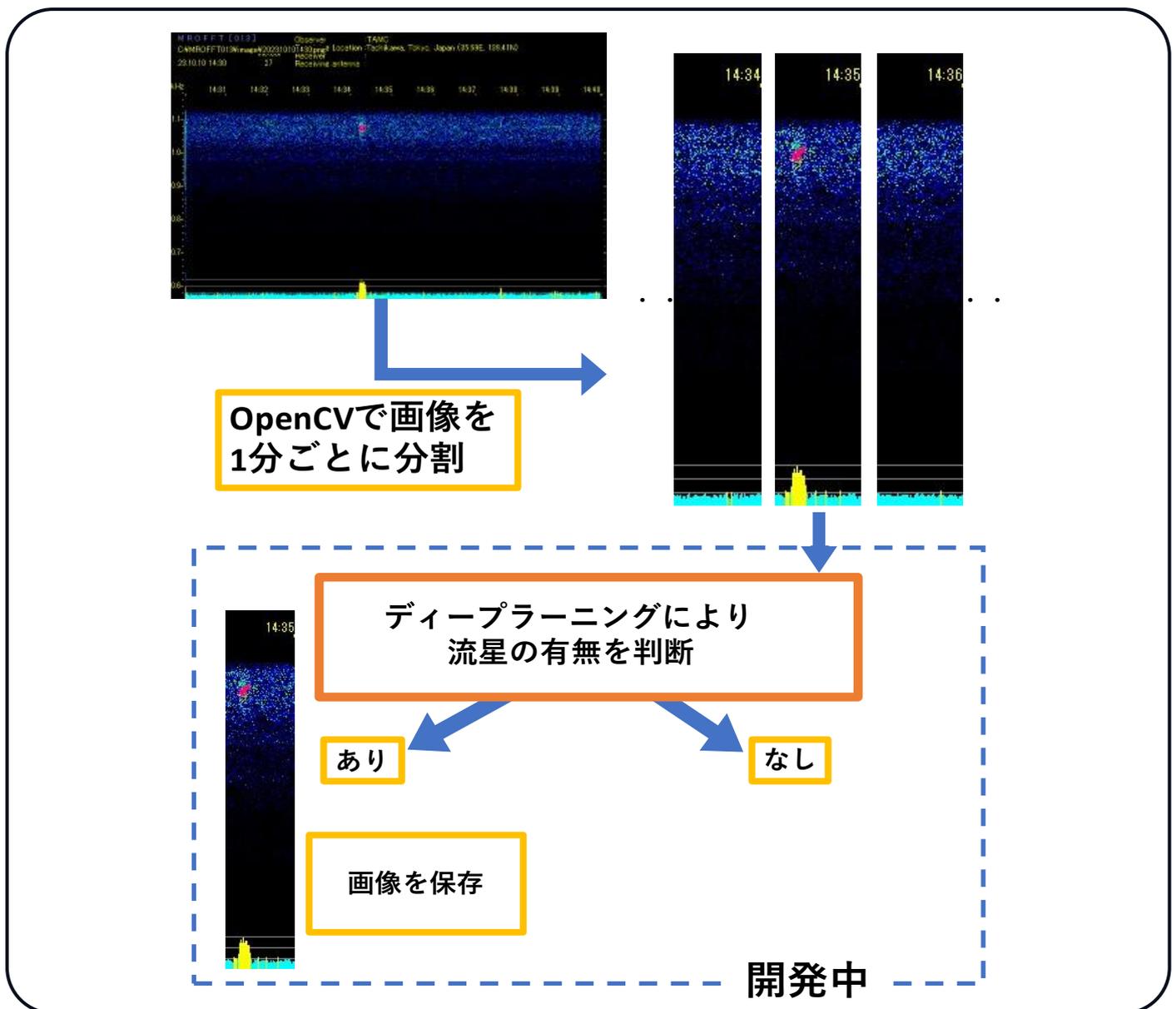


図 19 プログラムの構成図

6. 流星のリアルタイム検知システムの構築

ビデオ観測、電波観測によるリアルタイム流星検知システムの構築を行った。ビデオ観測では検知時刻と流星の検知動画を Discord に通知し、流星検知時刻を記録した CSV ファイルと合成動画を NAS に保存する。電波観測では流星検知時刻を記録した CSV ファイル、流星を検知したノイズ画像を NAS に保存する。

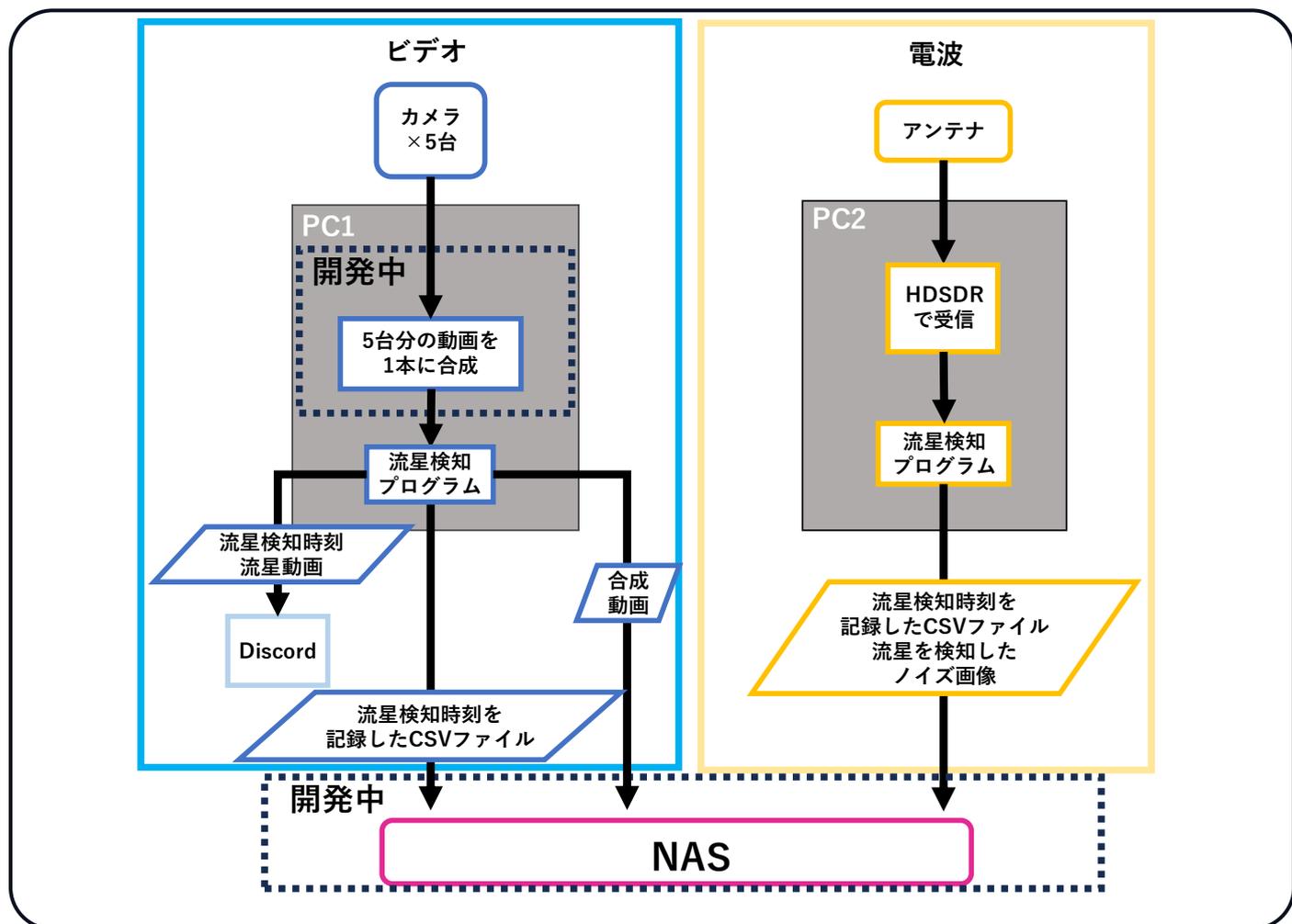


図 20 システムの構成図

I. システムの概要

<ビデオ観測>

[1] mnakada が開発した ATOMCam2 の機能を拡張するツールキットである『atomcam_tools』¹³⁾ を利用して 5 台のカメラから 1 分ごとに録画動画を PC へ転送。

[2] 5 台分の動画を 1 本に合成し、4 - III の検知プログラムで流星検知を行う。

(動画の合成は開発中で、リアルタイムでの流星検知は現在天頂方向 1 台のみで行っている。)

[3] 合成動画、流星検知時刻を記録した CSV ファイルを NAS に保存。

[4] 流星検知画像と流星出現動画を Discord に送信 (図 21)。

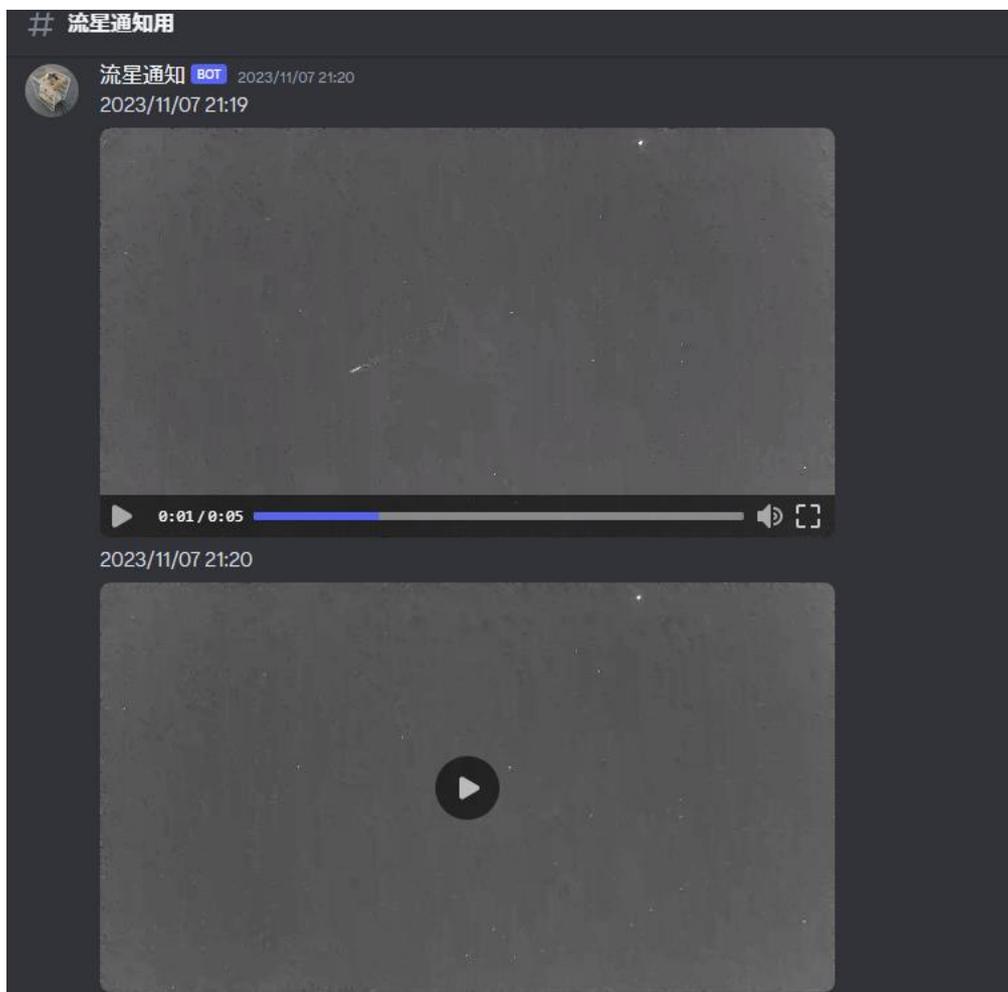


図 21 Discord の通知画面

<電波観測>

- [1] アンテナでノイズを拾い、HDSDR で受信。
- [2] 5 - III の検知プログラムにより流星検知を行う。
- [3] 流星検知時刻を記録した GSV ファイルと画像を NAS に保存にする。

II. システム開発の工夫点

ビデオ観測のシステムは Python の watchdog ライブラリ^{*}を利用し、動画の追加を自動で検知したら、流星検知プログラムにかけるアルゴリズムにしたことで、リアルタイムでの流星判別を可能にした。また、Discord はファイル保存の期限が現在はないことから、流星通知先として Discord を選択し、流星検知時刻と流星検出動画を遠隔で確認できるようにした。そして、それぞれビデオ観測と電波観測での流星検知時刻を記録し、NAS 上に保存することで、データの比較において、同一の流星の特定を容易にした。

^{*}ファイルの変更を監視するライブラリ

7. ペルセウス座流星群観測データの比較と分析

(2013年・2018年・2023年)

(i) 方法

本部で毎年行ってきた8月のペルセウス座流星群の観測について、過去9年間のデータを調べ、天候等も考慮して特に流星数が多く観測された2013年と2018年のデータと今年のデータを比較した。このデータをNMS(日本流星研究会)¹⁵⁾の同じ年のZHRと比較した。ZHRとは、雲量や最微星、光度比などを換算した、理想的な観測条件下での1時間の流星数を意味しており、以下の式を利用した。

また、各年の月齢¹⁶⁾を調べ、月齢と流星数の関係を探った。

流星の眼視観測

流星の計数観測とは、一時間あたりの流星数を記録するもので、世界中で行われている一般的な観測方法であり、個人で観測する方法(一人で全天をカバー)と、団体に観測する方法(複数人で全天を分担)がある。

本部では、4名で4方位をカバーし、記録者と記録補助者の6名で1チームを作って1時間毎に交代し、ローテーションを作って夜明けまで観測する方法をとっている。

この方法は、簡易で取り組みやすいが、観測者による能力や視力の差に影響をうけるという短所がある。また、本部のように初心者が多い場合は、見逃しや見間違いが、等級や流星の位置について誤りが発生しやすい。本部は部員が多いこともあり、2~3の観測チームを作って誤差を見るようにしている。

また、10分毎に平均雲量(=観測時の全天に占める雲や障害物(建物、山など視界をかくすもの)の割合、0~10の11段階)と、最微光星(各の見える最も暗い星の等級)を記録し、以下の式からCHR及びZHRを求めて視力や天候、場所による差を少しでも解消した数値から比較を行っている。

●HR(1時間あたりの流星数)の算出式

$$HR = N \cdot \frac{60}{T_{eff}} \quad (Nは観測した群流星数、T_{eff}は観測した時間を分で表したもの)$$

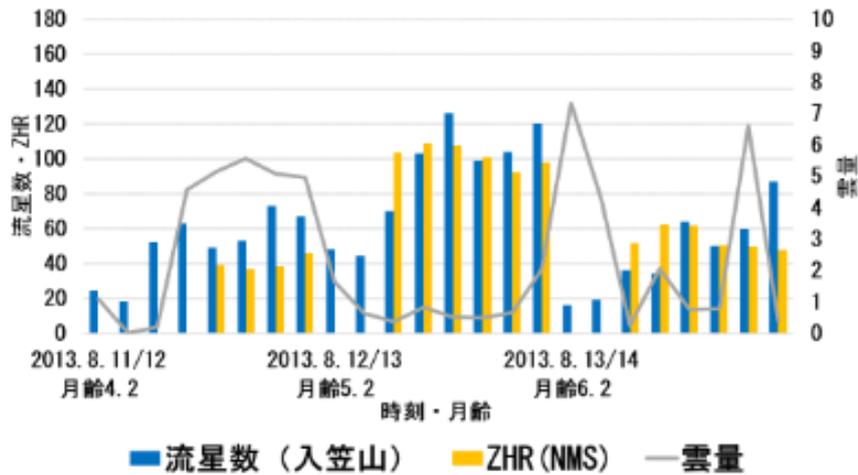
●CHR(雲などの観測視野を遮るものがなく、6.5等星まで見える空であったときの流星数の理論値)の算出式

$$CHR = HR \cdot \frac{r^{6.5-Lm}}{1-cl/10} \quad (clは雲量、Lmは最微星、rは光度比)$$

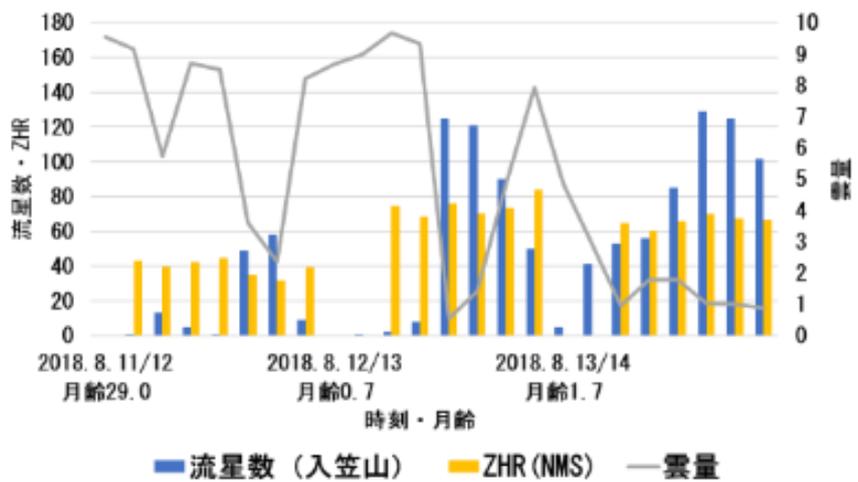
●ZHR(理想的な観測条件下での1時間の流星数)の算出式 NMS推奨

$$ZHR = \frac{CHR}{\sin^{1.5}(h_R + 5\cos^2 h_R)} \quad (h_Rは輻射点光度)$$

2013年ペルセウス座流星群



2018年ペルセウス座流星群



2023年ペルセウス座流星群

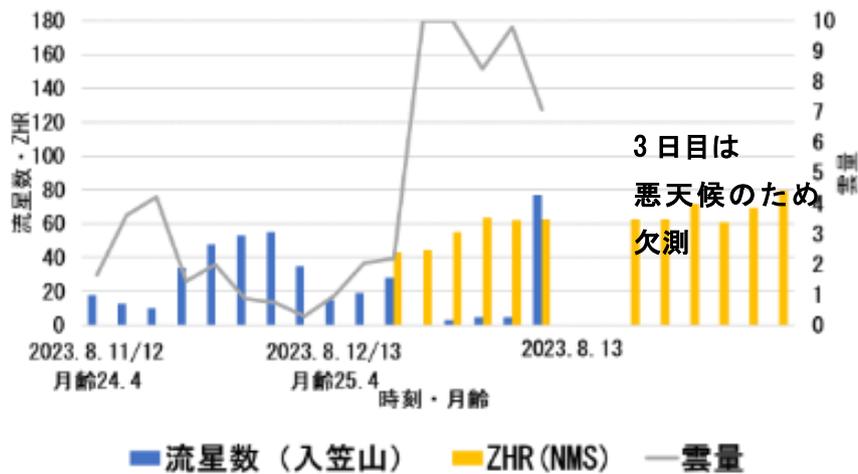


図 22 2013年、2018年、2023年の入笠山での流星数と（日本流星研究会（NMS）のZHR（理想的な観測条件下での1時間の流星数）と入笠山での雲量）

(ii) 結果と考察・2018年と2023年は、雲量が少ない時間帯ほど流星数が多くなる傾向が明確に表れた。

・月齢については、3年とも観測条件の良い月齢だった。

・NMSの同じ年のデータと比較すると2013年は傾向が概ね一致しており、他の年と比べて明らかに流星数が多かったことが読み取れる。

・2018年は、本部の観測数がNMSのZHRより大きく上回っていることから、散在流星を多く観測したことが推測される。

・2023年は他の年と比べて流星数が比較的少なかった。

8. 2023年ペルセウス座流星群の眼視観測とビデオ観測の比較

(i) 方法

本部の夏合宿で行った2023年8月のペルセウス座流星群観測では、毎年行っている眼視観測に加え、ビデオ観測装置を観測地（標高約1800mの入笠山山頂付近）に設置し、ビデオ観測*も行った。そして、ATOMCam2で1分ごとに記録した動画を、Pythonで自作したソフトで1枚に比較明合成した。次に、流星判別のプログラムは開発途中のため、記録した流星の合成画像約4800枚を目視で確認し流星の有無と流星数を判別した。そして、線分が確認された部分を動画で再確認して流星を特定した。最後に、他のカメラと重なっている部分で流星が出現した場合は二重で数えないようにした。

*ATOMCam2はWi-Fiによりカメラ内の時刻を補正しており、Wi-Fi環境がなかった入笠山では起動時の腕時計の時刻から観測時刻を求めているため、多少の誤差がある。

(ii) 結果と考察

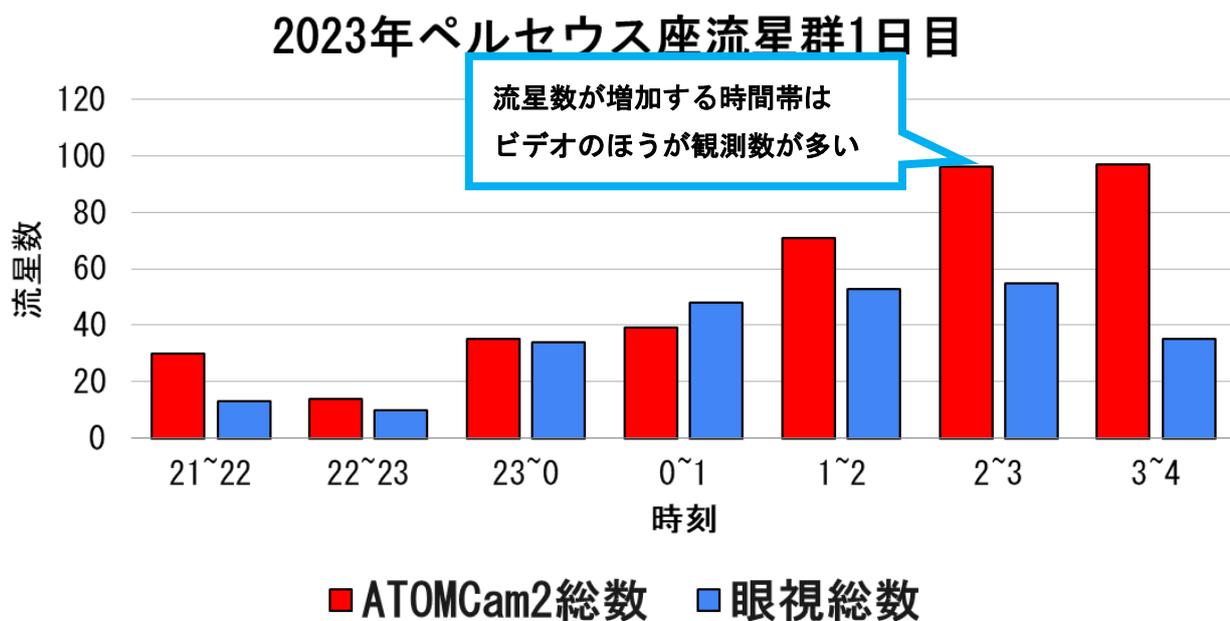


図 23 眼視観測とビデオ観測の比較-1日目

2023年ペルセウス座流星群2日目

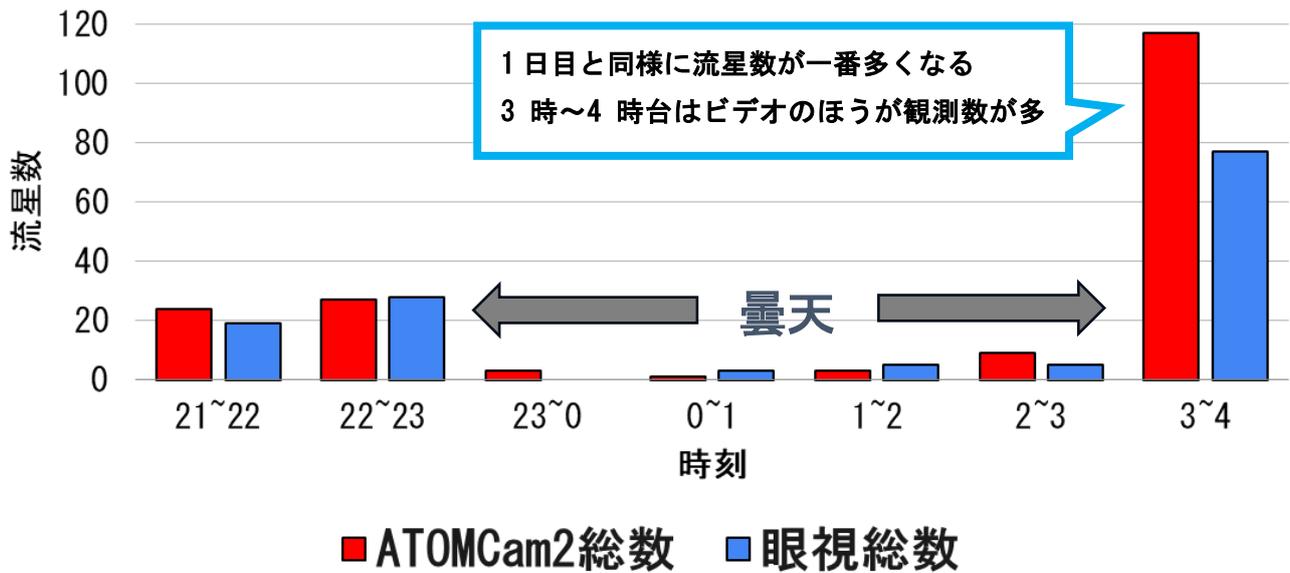


図 24 眼視観測とビデオ観測の比較-2日目

- ・1日目は21時~1時の間はビデオ総数と眼視総数で大きな差は見られなかった。しかし、1時から4時の流星数がピークとなる時間帯では、ビデオ総数が眼視総数を上回り、3時から4時台にかけては2倍近くの差をつけた。また、2日目についても曇天前の21時~23時の間はビデオ総数と眼視総数で、大きな差は見られなかった。しかし、曇天後の最も流星を捉える時間である3時から4時台にかけては、ビデオ総数が眼視総数を上回り、1.5倍近くの差をつけている。これは、流星数が増加した際に、眼視では捉えることの難しい等級の低い流星もATOMCam2では捉えることができたからだと考えられる。
- ・2日目の0時頃は曇り、データが多く取れなかった。その曇天の時間帯を除けば、全体的に3時~5時ぐらいのピークに近づくにつれて流星数が増加していったと考えられる。

9. オリオン座流星群の眼視観測、ビデオ観測、電波観測の比較



図 25 オリオン座流星群徹夜観測の様子 (2023年10月)

(i) 方法

2023年10月のオリオン座流星群では、本校屋上で眼視観測・ビデオ観測・電波観測の3つの観測を行った。そして、このときも流星判別のプログラムは開発途中だったため、7-IIと同様に、記録した動画を合成し、その合成画像約3000枚を目視で確認し流星数を特定した。

(ii) 結果と考察

2023年オリオン座流星群

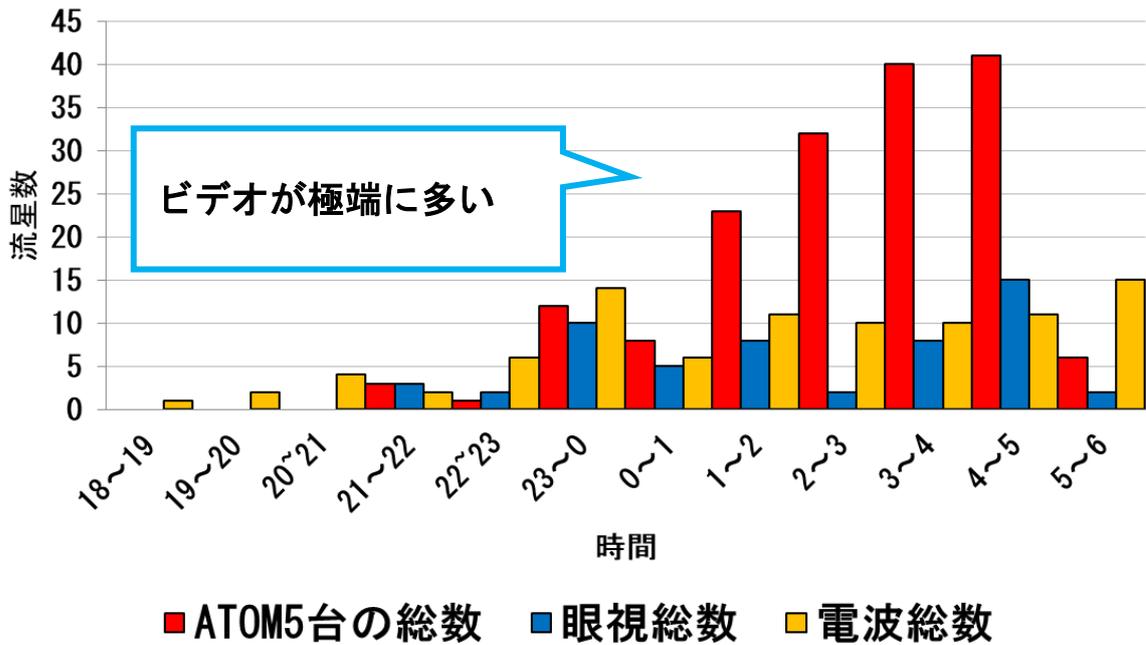


図 26 眼視観測、ビデオ観測、電波観測の流星数の比較

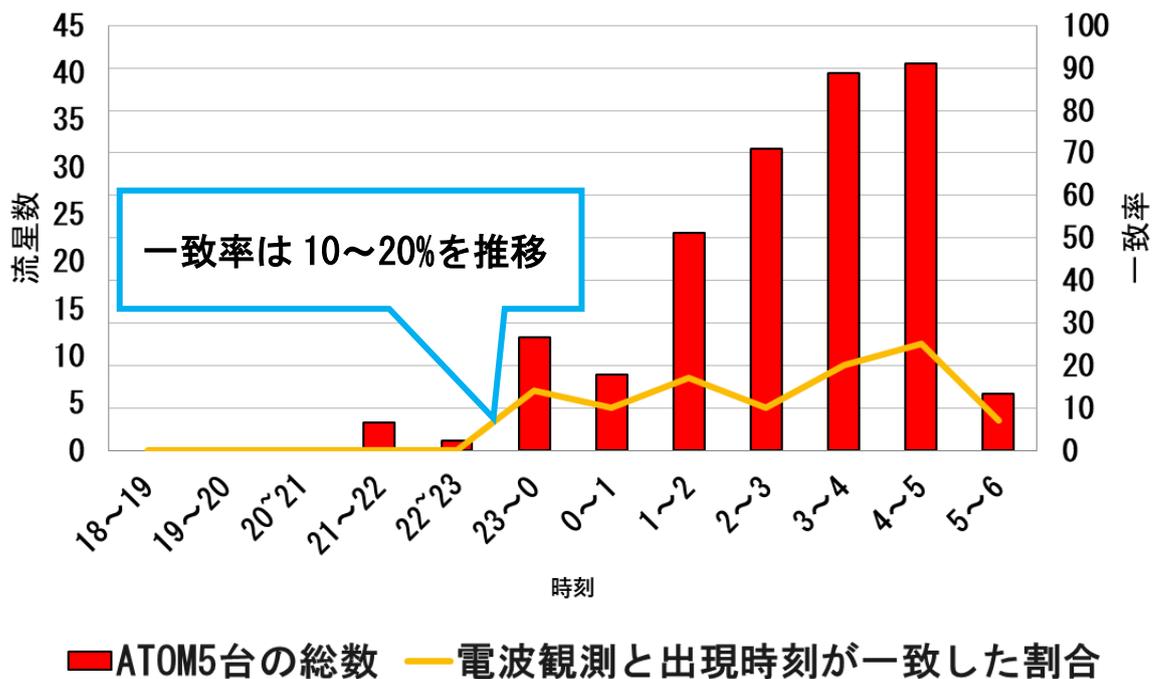


図 27 ビデオ観測と電波観測の出現時刻が一致した割合の変化

・眼視観測総数はビデオ観測総数の約 3 割、電波観測総数は約 5 割となり、ビデオ観測は眼視観測・電波観測と比べ極めて多くの流星を観測することができた。

・1 時間毎に、5 台の流星総数を母数として、ビデオでの流星出現時刻と電波のエコー発生時刻が一致した回数の割合を一致率とした。一致率は、23 時から 6 時にかけては、10~20%を推移した。

・眼視観測がビデオ観測より少なかった理由は、ATOMCam2 の赤外線ナイトビジョンが、眼視では確認の難しい等級が低い流星を捉えたからだと考えられる。

よって、ATOMCam2 を使ったビデオ観測は、眼視や電波以上に高い感度で多くの流星を捉えているといえる。

10. オリオン座流星群の極大前後一週間のビデオ観測の分析

(i) 方法

2023 年 10 月のオリオン座流星群の極大前後一週間の流星数の変化を調べるために、流星のピークとなる 3 時~5 時にかけて記録した、10 月 19 日から 25 日の天頂方向のカメラの HR を IMO（国際流星機構）や NMS¹⁵⁾ の ZHR と比較した。7-II、IIIと同様に、記録した動画を合成し、その合成画像を目視で確認し流星数を特定した。

(ii) 結果と考察

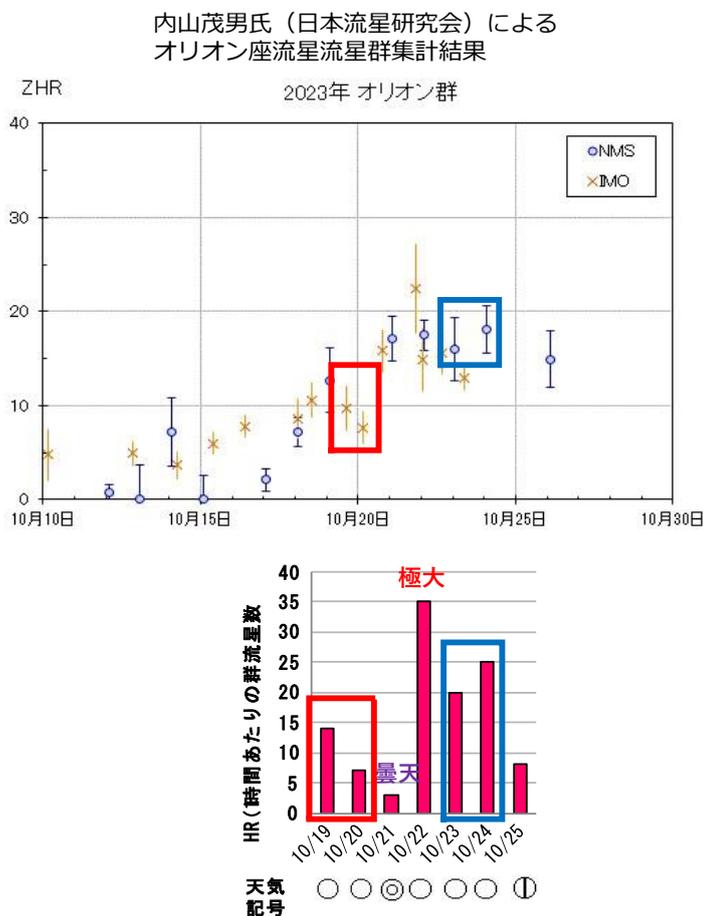


図 28 極大前後 1 週間の本校ビデオ観測と IMO、NMS¹⁵⁾ の比較

- ・図 28 で、赤枠部分の減少傾向が IMO のデータと青枠部分の増加傾向が NMS のデータと一致した。
- ・流星数は極大の日が最も多く、その後は減少していった。
- ・極大前日（10 月 21 日）は曇天であったため、流星数は極端に少なかった。

11. 研究Ⅴ：夜空の明るさのビデオ観測に対する影響 (本部：夜空の明るさチームの研究結果より)

(i) 方法

本部では、別の研究チームが夜空の明るさや光害の可視化に関する研究¹⁷⁾¹⁸⁾を行っている。2023年8月に入笠山で行ったペルセウス座流星群と、10月に本校屋上で行ったオリオン座流星群の際に、SQM-L と呼ばれる明るさの値を検出する機械を用いて、方位と高度ごとに夜空の明るさを観測し(図 29. 30)、本部の先輩が開発した Python プログラムによりグラフ化して比較した(図 31)。

また、流星のビデオ観測総数に対する眼視観測総数の割合を、入笠山で観測したペルセウス座流星群とオリオン座流星群で比較した。



図 29 SQM-L と観測台

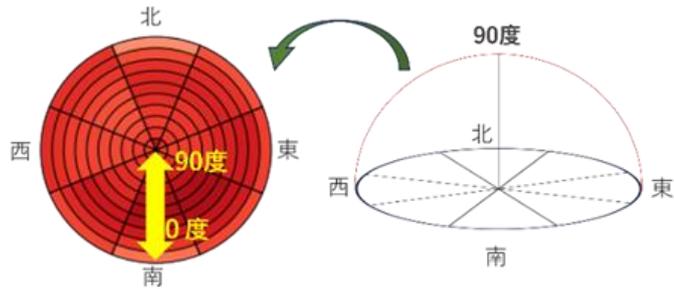
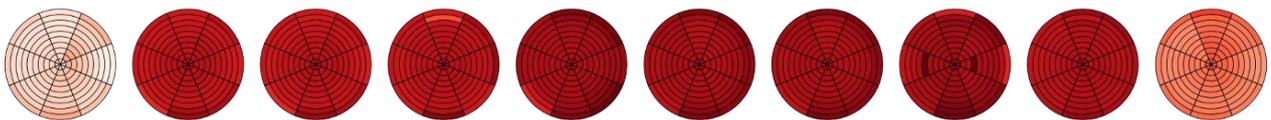


図 30 8方位m, 高度10度毎に図ったSQMの値を色で示し、円グラフで可視化した図(2023本部の研究¹⁸⁾より)

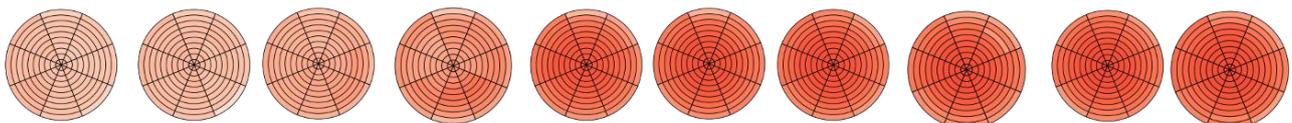
(ii) 結果と考察

- ・観測した値を比較すると、本校屋上の方が著しく明るいことが分かった。
- ・研究Ⅱ、Ⅲの結果より、流星のビデオ観測総数に対する眼視観測総数の割合は、ペルセウス座流星群では約6~7割、オリオン座流星群では約3割と、オリオン座流星群ではビデオ観測と眼視観測で大きな差が発生していることが分かった。これは、本校屋上の方が入笠山よりも夜空が明るいからだと考えられる。
- ・オリオン座流星群でビデオ観測が眼視観測よりも多くの流星を観測できたのは、ATOMCam2の赤外線ナイトビジョンの感度が非常に良く、夜空の明るさに大きな影響を受けずに観測することができたからだと考えられる。これらのことから、ATOMCam2を用いたビデオ観測は、眼視観測ほど夜空の明るさの影響を受けることなく流星を観測できると言える。

高原 (入笠山、晴れ) 2023.0812.19~0813.04 入笠山 (長野県富士見町、1791.5m)



光害地 (立川,曇りのち晴れ) 2023.1021.19~1022.04 立川高校 83.5m



※赤色が濃いほど暗い

図 30 入笠山と立川高校の夜空の明るさ (2023本部の研究¹⁸⁾より)

12. まとめ

・ビデオ観測は、ペルセウス座流星群、オリオン座流星群において電波観測や眼視観測よりも多くの流星を観測することに成功した。眼視観測との比較から、ATOMCam2 による観測では夜空の明るさの影響を受けにくいことが分かった。

・IMO や NMS のデータと比較すると、極大前日の曇天日を除き、流星数や変化の傾向が似通っていた。これにより、ビデオ観測によって得られたデータの信憑性が高いことが確認できた。

・加えて、天頂方向の ATOMCam2 に関して流星の自動検知システムの構築に成功した。また、電波観測では、HSDR と MROFFT を用いた HRO での流星の観測、流星検知プログラムにおける OpenCV での画像の切り取りに成功した。

13. 今後の展望

ビデオ観測については、ビデオ 5 台分の動画を合成し、天頂以外の 4 方位も同時に流星判別を可能にする。また、カメラに映る最微等級を確認してカメラの精度も確認していく。公開されているライブカメラに映った流星を利用して、流星速度の導出、位置判定も行っていきたい。電波観測と結果を比較するうえで、ビデオの全天観測の結果と電波の西方のみの結果では対等に比較できないため、西方のみに向けたカメラを用意して同条件で比較もしていく。

ビデオ観測装置の制作については、気温が低いと透明半球に結露が発生するという課題がある。半球の内側と外側にスマート温度計を設置し、気温の変化の様子から、シリカゲル（乾燥剤）やファンの取り付けなどの対策を行う。

電波観測については深層学習による流星エコー画像の自動判別プログラムの開発を進める。また、現在西方向にしかアンテナを向けていないため、北方向にもアンテナを取り付け、精度を高める。

12 月のふたご座流星群を眼視・電波・ビデオの 3 手法により観測を行い分析する。オリオン座流星群の眼視観測では 3 方位しか行っていないため ZHR を正確に計算できないという問題が生じたことから、ペルセウス座流星群同様に 4 方位での観測を行う。

14. 謝辞

本研究は、気象観測機器コンテストの支援を受けて実施しました。研究を行うにあたり、天文気象部顧問の可長清美先生にご指導をいただき、東京都立大学都市環境学部地理環境学科非常勤講師の内記昭彦氏、天文気象部 OB の浪波翔太氏、浜島悠哉氏には観測機器の制作についてご指導ご協力をいただきました。研究の最初の立ち上げについては、現在アメリカに留学している本部の 2 年生大城慧斗氏に協力をいただき、夜空の明るさについては、本部の「光害の可視化」研究チームにデータを提供してもらいました。

15. 参考文献

- 1) 国立天文台. 「流星群」. <https://www.nao.ac.jp/astro/basic/meteor-shower.html>
- 2) 浜島悠哉, 田中陽登, 馬場光希, 安原拓未 (2021). 「カメラと RaspberryPi を用いた視程観測装置の自作」.
『第3回中高生情報学研究コンテスト』
- 3) ATOM. 「ATOMCam2」. <https://www.atomtech.co.jp/products/atomcam2>
- 4) 原口美悠 (2021). 「流星自動検出パイプラインの構築」『岡山大学地球および惑星大気科学研究室 卒業論文』
- 5) 北山直洋 (2019). 『Python で始める OpenCV4 プログラミング』. カットシステム
- 6) NumPy. 「numpy.maximum」.
<https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.maximum.html>
- 7) Python. 「concurrent.futures - 並列タスク実行」.
<https://docs.python.org/ja/3/library/concurrent.futures.html>
- 8) Python でいろいろやってみる. 「画像を二値化して黒と白のピクセルを数える」.
<https://tat-pytone.hatenablog.com/entry/2019/02/24/213549>
- 9) 鳥取大学. 「画像の閾値処理」.
http://labs.eecs.tottorui.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_thresholding/py_thresholding.html#thresholding
- 10) 吉村康弘, 杉浦司, 五木田和也 (2022). 『OpenCV ではじめよう ディープラーニングによる画像認識』. 技術評論社
- 11) TensorFlow. <https://www.tensorflow.org/?hl=ja>
- 12) Neural Network Console. 「Deep Learning 入門」.
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLg1wtJlhfh23pjdFv4p8k0BYyTRvzseZ3>
- 13) mnakada . 「atomcam_tools」. https://github.com/mnakada/atomcam_tools
- 14) 流星電波観測国際プロジェクト. 「2023年オリオン座流星群電波観測速報」.
<https://www.amro-net.jp/flash/ori-2023.html>
- 15) 流星の部屋.
<http://s-uchiyama.na.coocan.jp/meteor/shwr-act/10ori-act.html>
- 16) 暦のページ. 「月齢カレンダー」. <http://koyomi8.com/moonage.html>
- 17) 立川高校天文気象部 吉原 達紀, 平岡 七海, 千葉 愛璃咲, 袴田 采海, 門馬 暖大 (2023).
『光害の可視化～街明かりが夜空に与える影響～』. 「日本天文学会第25回ジュニアセッション」
- 18) 立川高校天文気象部 袴田采海, 石田寛和, 川端大平, 森田幸香, 古都紗妃, 中村桃子 (2023)
『光害の可視化～街明かりが夜空に与える影響～』. 「第12回気象観測機器コンテスト」(2023)発表予定