



流星の自動観測を目指す～流星の経路特定と反射領域の可視化～

東京都立立川高等学校 天文気象部B 西 梨杏 大谷 勇人 奥出 理人 村田 圭総 (高2)

研究要旨

本校天文気象部では、70年前の1953年から夏のペルセウス座流星群の眼視観測を開始し、2011年からは夏の高原でペルセウス座流星群、冬の本校屋上でふたご座流星群の観測をしてきた。我々は眼視観測ができない日も流星を観測したいと考え、安価で感度の高い防犯カメラ5台によるビデオ撮影とHRO電波による観測の2つの手法を併用して、**今までにない新たな自動観測システム**の構築を目指し、**自作装置と機械学習等による検知プログラム**を開発した。2023年8月より複数の流星群の観測で試行し、眼視と製作装置による膨大なデータを個々に比較しながら検知プログラムを改良した。2024年には分析結果から、ビデオ観測で**三次元座標上での流星経路特定**に成功させた。電波観測では、デフォルトのデータと比較・同定しやすくするため、先行研究では2Dのみで表現されていた**電波の反射領域について3Dシミュレーション**を試み、可視化に成功した。最終的にビデオと電波で幾つかの流星を同定し、**実経路と反射領域を同時に出力**することができた。

研究目的

安価で感度の高い防犯カメラ5台を使ったビデオ観測と、曇りでも観測可能な電波観測を併用し、機械学習等の検知プログラムを用いた新たな方法で流星を検知・自動判別する観測システムを開発する

- ビデオ観測で日心軌道や対地経路の特定を目指し、流星が宇宙空間のどこからきて、地表面に対しどのように流れたのかを探る
- 電波観測では、ビデオと電波のデータの同定を容易にするために反射領域を3Dでシミュレーションする。
- 最終的に流星を自動で判別するプログラムやリアルタイムでモニタリングできる自動観測システムを構築する。

研究方法

また、本研究の流星の観測方法とそれからわかることの概略図を図2のようにまとめた。

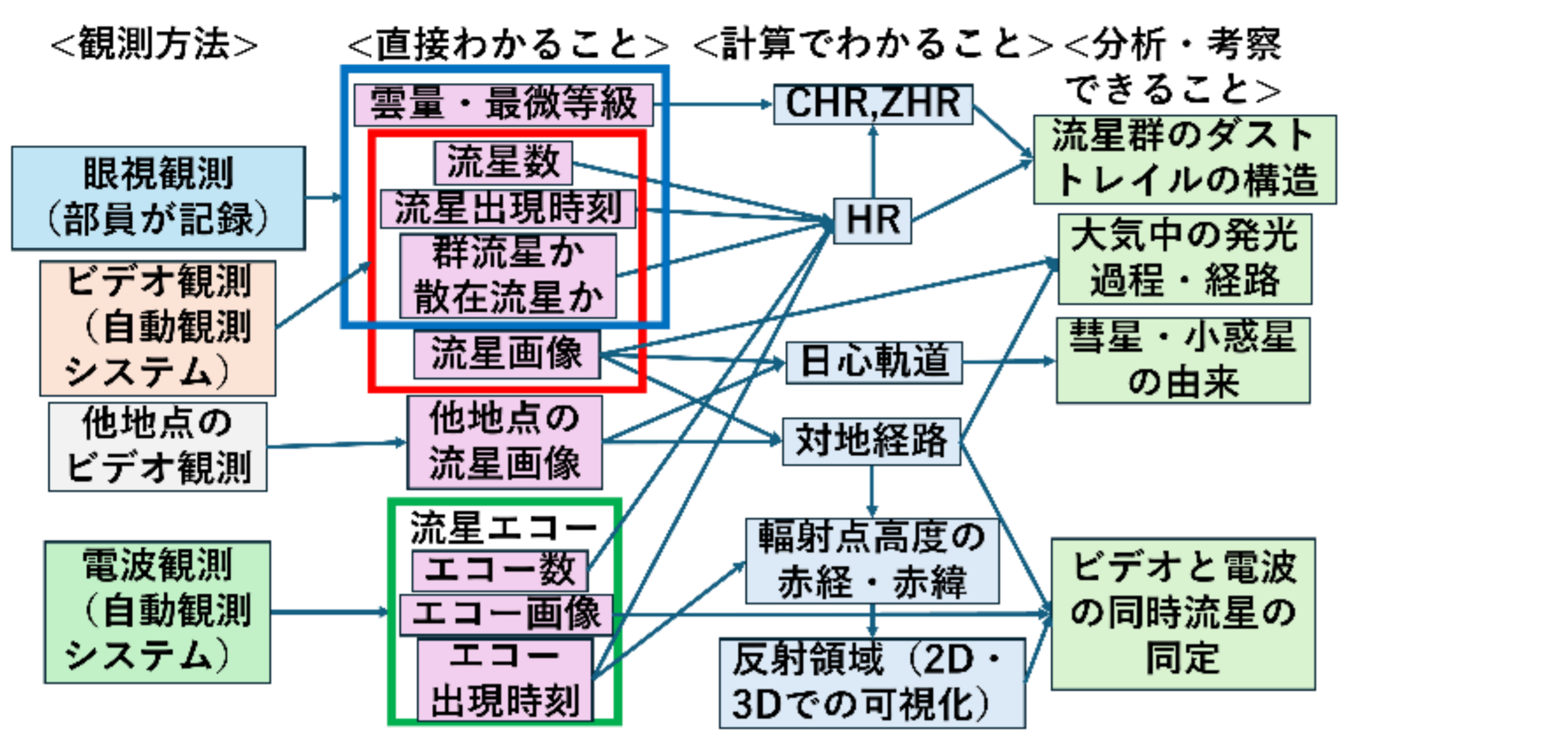


図2 本研究の概略図(参考:『流星 | 観測の実際』¹⁴⁾)

ビデオ観測装置の製作と検知プログラムの開発

安価な赤外線搭載防犯カメラATOMCam2を5台用いて**全天を網羅する装置**を製作した(図3)。現在は**タイマー制御による日除け装置**を製作中である。



図3 ビデオ観測装置の製作

<検知プログラムの開発> ※詳しくは天文気象部Aへ

フレーム間差分と機械学習を組み合わせて流星検知するプログラム

流星が写った際の2フレームの**差分画像** (左図は拡大したもの) 輪郭抽出し、一定面積以上の白ピクセル数を検出した場合流星候補に

meteor 0.93 **機械学習 (YOLOv9) による流星の判別**

検出結果を自動的に枠で囲んで出力

F値 (モデルの予測結果を評価する指標:0-1.0の値を取り値が大きいほど評価が高い)

| | |
|-------|-------|
| 2023版 | 2024版 |
| 0.27 | 0.52 |

F値は2倍へと大きく向上した。機械学習モデルの改善を引き続き行う

結果: **眼視観測より多くの流星を正確に捉えることに成功した。** また、ver2は今までと比較して検知時間が6分の1に減らすことに成功した。再現率が低いのは等級が極端に低い流星が捉えられなかったためである(図4)。

図4 ビデオ観測の検知プログラム (2024年v2)

電波観測装置の製作と検知プログラムの開発

<電波観測装置の製作>

アンテナを設置して福井や豊川等の電波(アマチュア無線)を受信し、パソコンと接続して、流星エコーの観測に成功した。これは従来から行われているHROと呼ばれる手法である。

<物体検出プログラムの開発>

得られた電波の画像データから、**物体検出**を用いて流星を検知するプログラムを開発した(図6)。約5000枚の画像からデータセットを自作し、**YOLOv8**を用いて学習した。

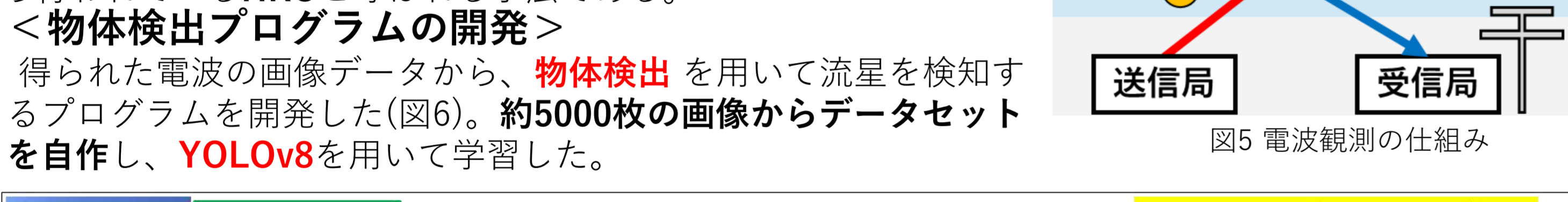


図5 電波観測の仕組み

SDRで電波を受信 → **MROFFTで音声を画像化** → **ノイズ画像が保存される** → **機械学習(YOLOv8)の自作モデルで物体検出**

適合率 0.776 再現率 0.630

図6電波観測の検知プログラム(2024)

<結果> **流星の検出に成功** <改善点> **ノイズ、直接波の誤検知**

2024年みずがめ座η流星群・ペルセウス座流星群の分析

2024みずがめ座η流星群(立川) 2024ペルセウス座流星群(入笠山、立川)

※流星判別プログラムでは誤検知や見逃しがあつたため、ビデオ・電波とも全ての画像を目視で確認し流星を判別した。

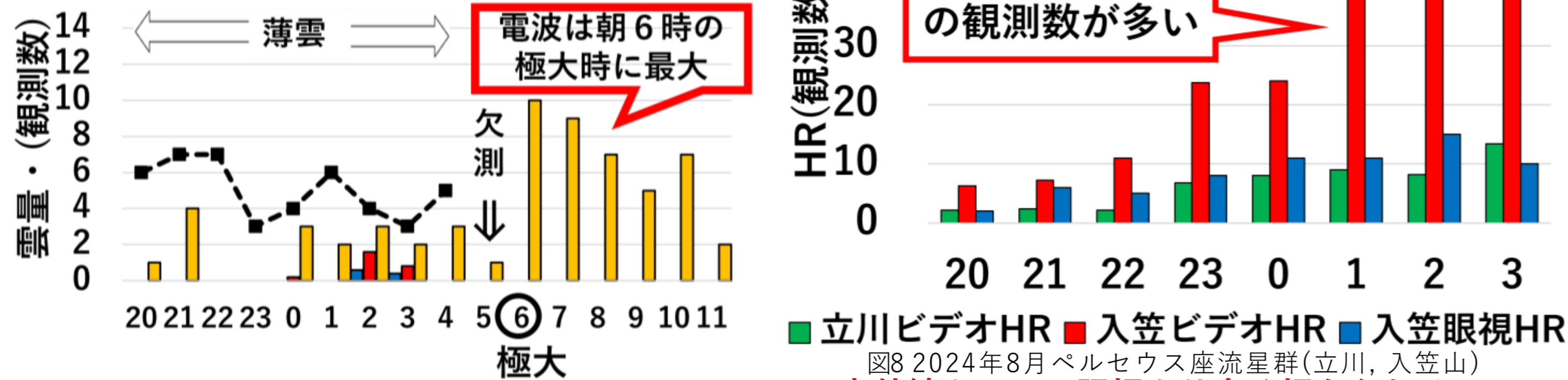


図7 2024年5月みずがめη流星群 (立川)

電波は天候・空の明るさに影響を受けない
→ **電波観測の観測数が多くなった**

→ **入笠ビデオ>入笠眼視**
立川は街明かりの影響で空が明るい
→ **入笠ビデオ>立川ビデオ**

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、天文気象部顧問の可長清美先生に全体のご指導をいただきました。流星の経路特定は平塚市博物館の藤井大地学芸員、電波観測用アンテナの感度調整は東村山HRO送信者の神作哲夫氏と日本流星研究会の杉本弘文氏、反射領域計算は流星観測国際プロジェクトの小川宏氏、観測機器の制作は天文気象部OBの方々にご協力いただきました。協力してくださった方々に感謝申し上げます。

研究背景

本日は、毎年夏のペルセウス座流星群で3晩、冬のふたご座流星群で1晩、計4回の眼視による流星観測を行っている。流星数が最多になる極大日の前後や、他の流星群も含め、流星を毎日観測したいが、徹夜観測日をこれ以上増やすのは難しい。そこで無人で観測データを得るために、ビデオ観測を考えたが、流星が写るような超高感度の全天カメラは非常に高価である。また、ビデオだけでは晴れた日しか観測できない。

2024年ペルセウス座・ほうおう座流星群の経路特定

ペルセウス座流星群の複数の群流星の対地軌道などを以下のように求めた。

ほうおう座流星群とは、1956年に日本の南極観測隊によって流星雨として観測されて以降ほとんど出現の見られない「**幻の流星群**」と呼ばれている流星群である。このほうおう座流星群由来とされる流星を**2024/11/12 20時41分51秒に観測した**。観測から求めた日心軌道は母天体の日心軌道と近似したため、この流星はほうおう座流星群の群流星の可能性が高い。

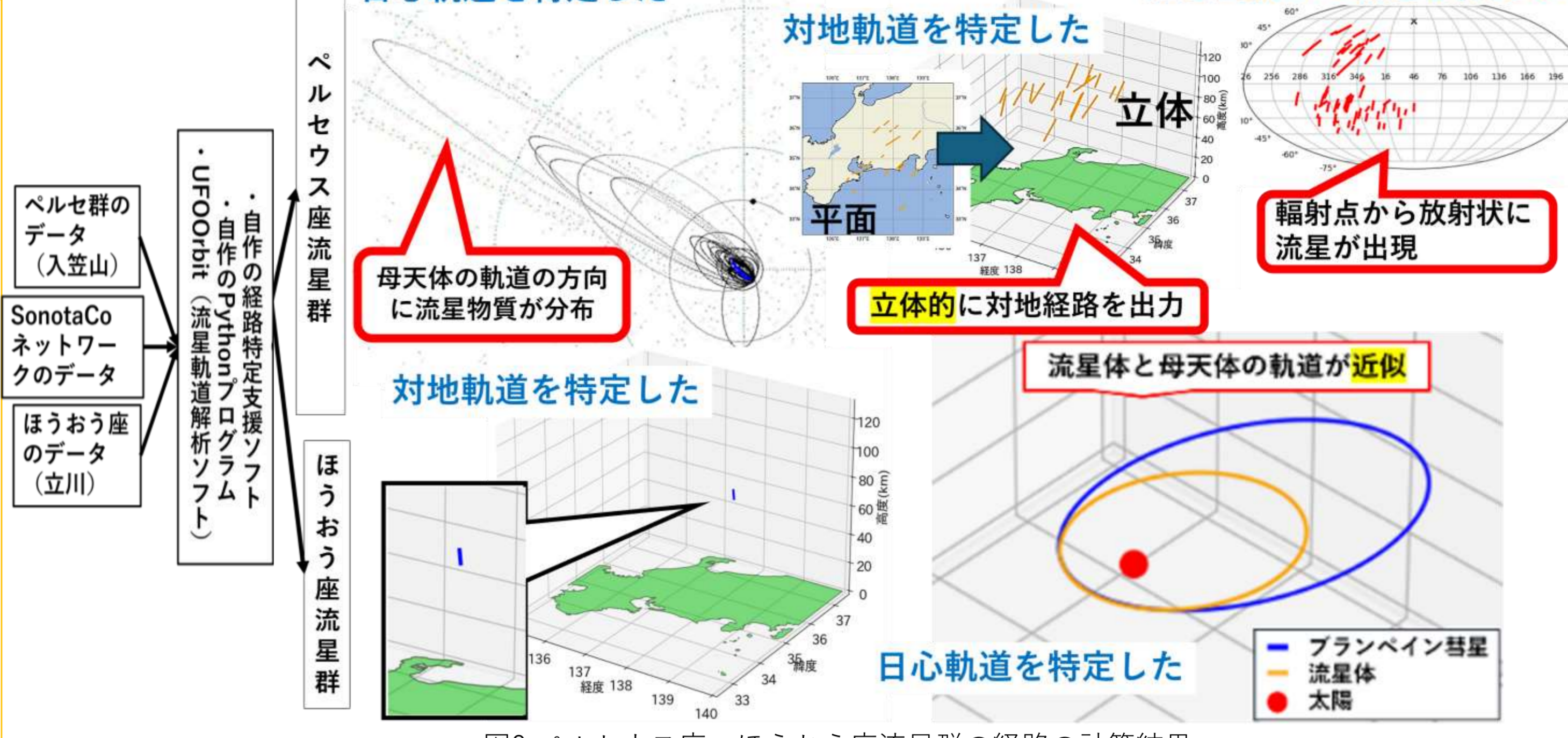


図9 ペルセウス座・ほうおう座流星群の経路の計算結果

電波反射領域の3Dシミュレーション

電波データから流星群を分析するには電波とビデオのデータを同定する必要があるが、エコー電波の到来方向が不明であるために極めて難しい。そこで、電波の**幾何学上の観測領域**すなわち**反射領域**について渡邊潤一、小川宏、内海洋輔などによって議論とシミュレーションがされてきた。

先行研究

内海(2002)によると、電波の反射領域の全体は右図のような回転楕円体になり、これについて次の連立方程式が成り立つ。 a, d, z, l, m, n にはそれぞれ以下の任意の値を代入する。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2 - d^2} + \frac{z^2}{a^2 - d^2} = 1$$

$$2x \frac{l}{a^2} + \frac{2y}{a^2 - d^2} \cdot m + \frac{2z}{a^2 - d^2} \cdot n = 0$$

任意の値を代入する文字

- a = (回転楕円面の長半径)
- d = (送受信局間の距離の1/2)
- z = (流星の発光高度)
- θ = (輻射点高度), φ = (輻射点方位角)

iprmo.orgより引用

<反射領域の3Dシミュレーション>

先行研究: Excel上で反射領域を計算 → 2D(平面)でしか出力できなかった

本研究: **独自に開発したPythonプログラムで計算**

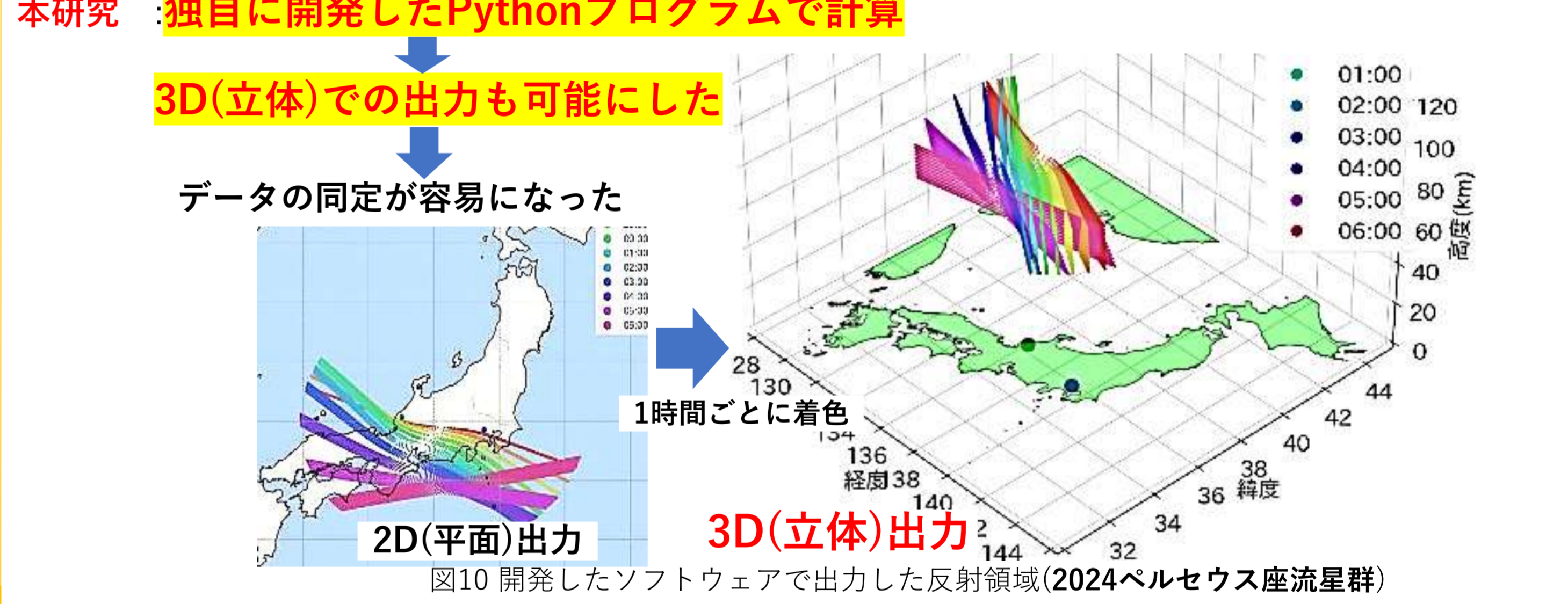


図10 開発したソフトウェアで出力した反射領域(2024ペルセウス座流星群)

<同時流星の経路と反射領域>

電波とビデオで同時観測したみずがめ座流星群由来の流星の経路と反射領域をプロットした(図11)。

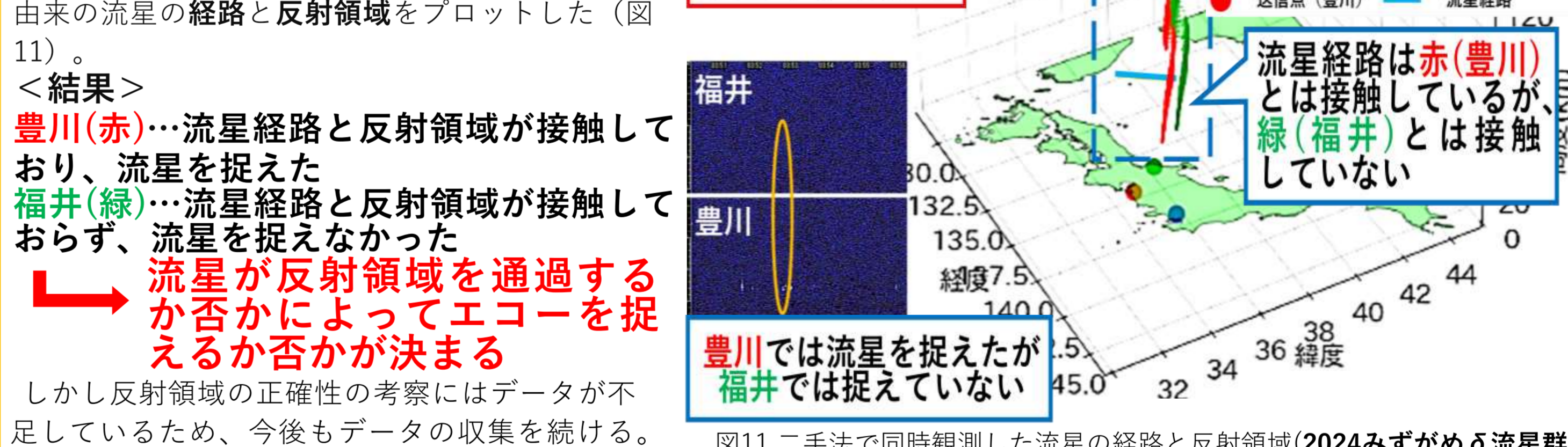


図11 二手法で同時観測した流星の経路と反射領域(2024みずがめη流星群)

ヘッドエコー観測による流星経路特定

流星頭部で反射され、流星体の速度に起因するドップラーシフトを有するエコーのことを**ヘッドエコー**と呼ぶ。近年、鈴木和博などによって、ヘッドエコーの観測から流星経路を特定する試みが始まっている。

先行研究

鈴木(2022)によると、ある時点でのドップラーシフトが観測できれば、流星の視線方向への速度成分 $v \cos \theta$ が導かれ、流星経路ベクトルと観測方向ベクトルのなす角 θ が決定すれば流星の観測速度が求められる。これについて以下の関係式が成り立つ。このとき、 c は光速である。

$$f_d = \frac{2v \cos \theta f_t}{c}$$

任意の値を代入する文字

- v = (流星地心速度)
- θ = (流星経路と視線方向の成す角)
- f_t = (送信周波数)

図13 角θのイメージ

先行研究を利用して、**ヘッドエコー観測から流星経路を特定する独自の方法を試案した。**

このとき右の仮定を用いた。

$$\left\{ \begin{aligned} (f_{0x} - R_{1x})^2 + (f_{0y} - R_{1y})^2 + f_{0z}^2 &= (f_0 |v_g| / c)^2 \left\{ \left(\frac{2|v_g| f_t}{f_d c} \right)^2 - 1 \right\} \\ (f_{0x} - R_{1x}) \cos \theta_r \sin \theta + (f_{0y} - R_{1y}) \cos \theta_r \cos \theta + f_{0z} \sin \theta_r &= 0 \end{aligned} \right.$$

左の連立方程式を解くことで、流星経路が求まると考えられる。今後データを集めて、この方法を確かめる。

まとめ・今後の展望 ビデオ・電波の流星観測装置を製作し、機械学習によるリアルタイムでの流星検知システムを完成させ、それらを用いて3手法による観測結果を比較した。

ビデオは3Dでの経路特定を行い、電波は反射領域を3Dで可視化することに成功した。

→ 反射領域の正確性にはデータが不足しているため、今後もデータの収集を続ける。

電波からの経路特定を行うためにヘッドエコーの観測を行い、流星経路を特定するための独自の方法を試案した。

→ データを収集してこの方法が正しいかを確かめる。

参考文献 1)天文気象部(2023)『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～』[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)『流星観測の自動化と気象観測システムの構築』[日本地球惑星科学連合学会] 3)ATOM. [ATOMCam2] 4)m Nakada. [atomcam_tools] 5)流星電波観測国際プロジェクト 6)東京大学教育学部附属中等教育学校 内海洋輔(2002). [HRO流星レーダーの観測領域の計算] 7)小川宏(2022). [ふたご座流星群における反射領域の考察 (HROとFROの違い)] 8)渡部潤一(1984). [群流星に対するFM流星出現領域の計算(II)] 9)長谷川均(2024). [ATOMCamで検出された流星検出と位置測定] [流星電波観測報告会2024] 10)Astrometry.net 11)WongKinYiu. [yolov9] 12)SonotaCo.com 13)平塚市博物館. [火星と隕石] 14)斎藤馨児,長沢工(1984). [流星 | 観測の実際] 恒星社厚生閣 15)AstroArts ストラナビゲータ1