

19T 流星の自動観測装置の製作と流星群の分析

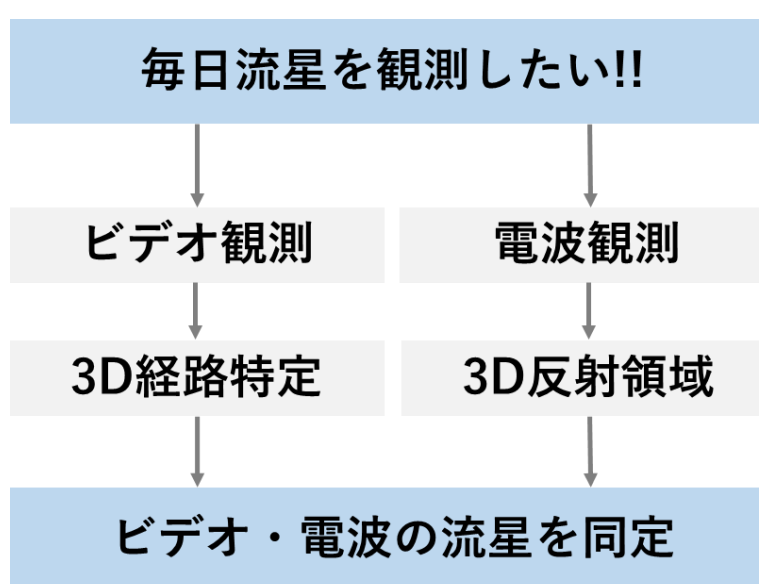
東京都立立川高等学校 天文気象部 水澤 資人 西 梨杏 大谷 勇人 奥出 理人 村田 圭総 (高2)

●研究要旨

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、**ビデオ・電波の2手法を併用した**新たな自動観測システムを構築した。

分析結果から、ビデオ観測では三次元座標上での流星経路特定を、電波観測では電波の反射領域について3Dシミュレーションを試み、ビデオ観測のデータとの比較・同定を目指した。

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

高感度防犯カメラでのビデオ観測
曇りでも観測可能である電波観測

機械学習プログラムによる
流星の自動判別システムの開発

ビデオ観測で日心軌道や対地経路を特定

→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

電波観測では反射領域を3Dでシミュレーション

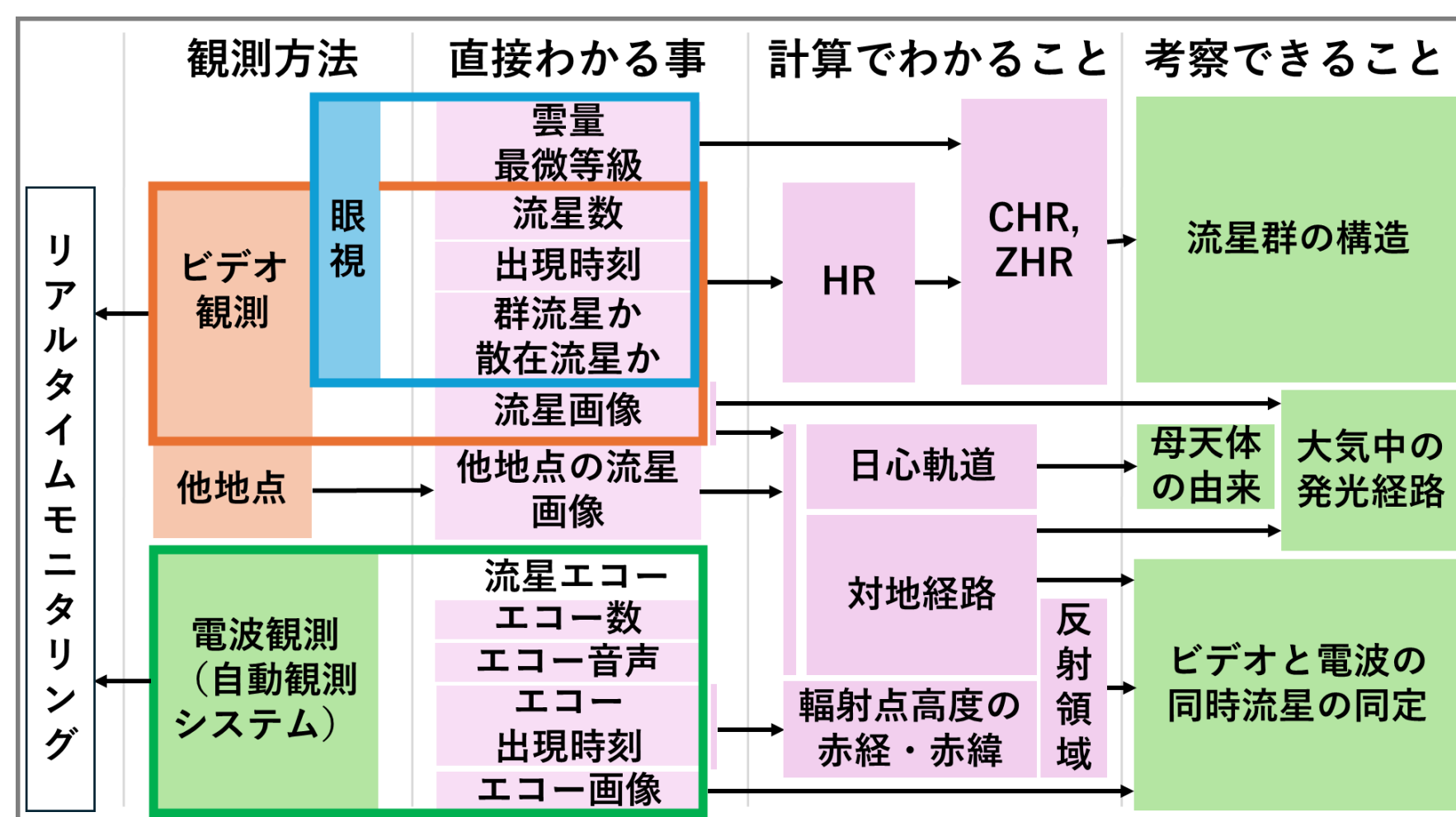
→ビデオと電波のデータの同定を容易に

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

本研究での流星の観測方法と、それからわかる事の概略図を図のようにまとめた。

ビデオ・電波の2手法の観測により様々なことが考察できる



ビデオ観測装置の製作と検知プログラムの開発

<ビデオ観測装置の開発>

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Raspberry piとステッピングモーターを利用したカメラ保護用の**自動日除け装置**の実用化を目指す。

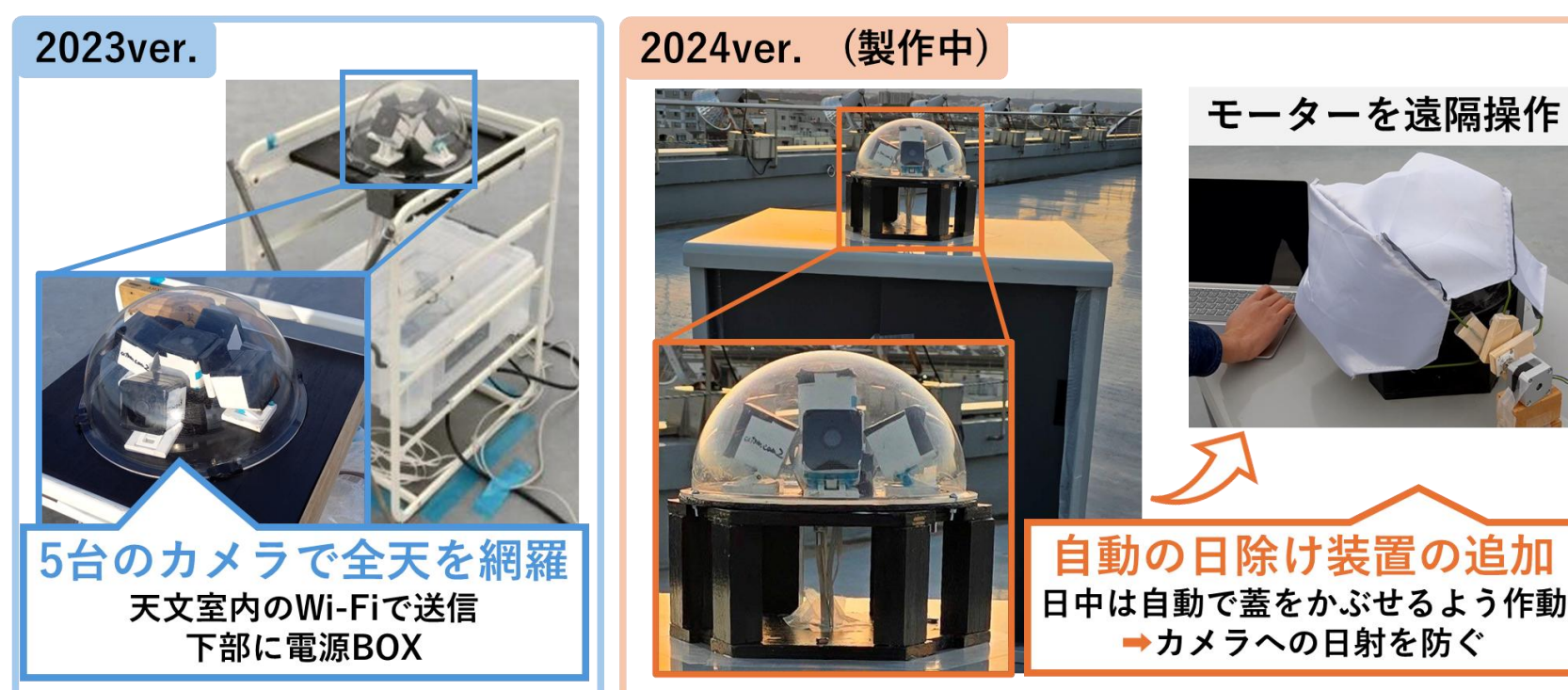


図1 ビデオ観測装置の製作

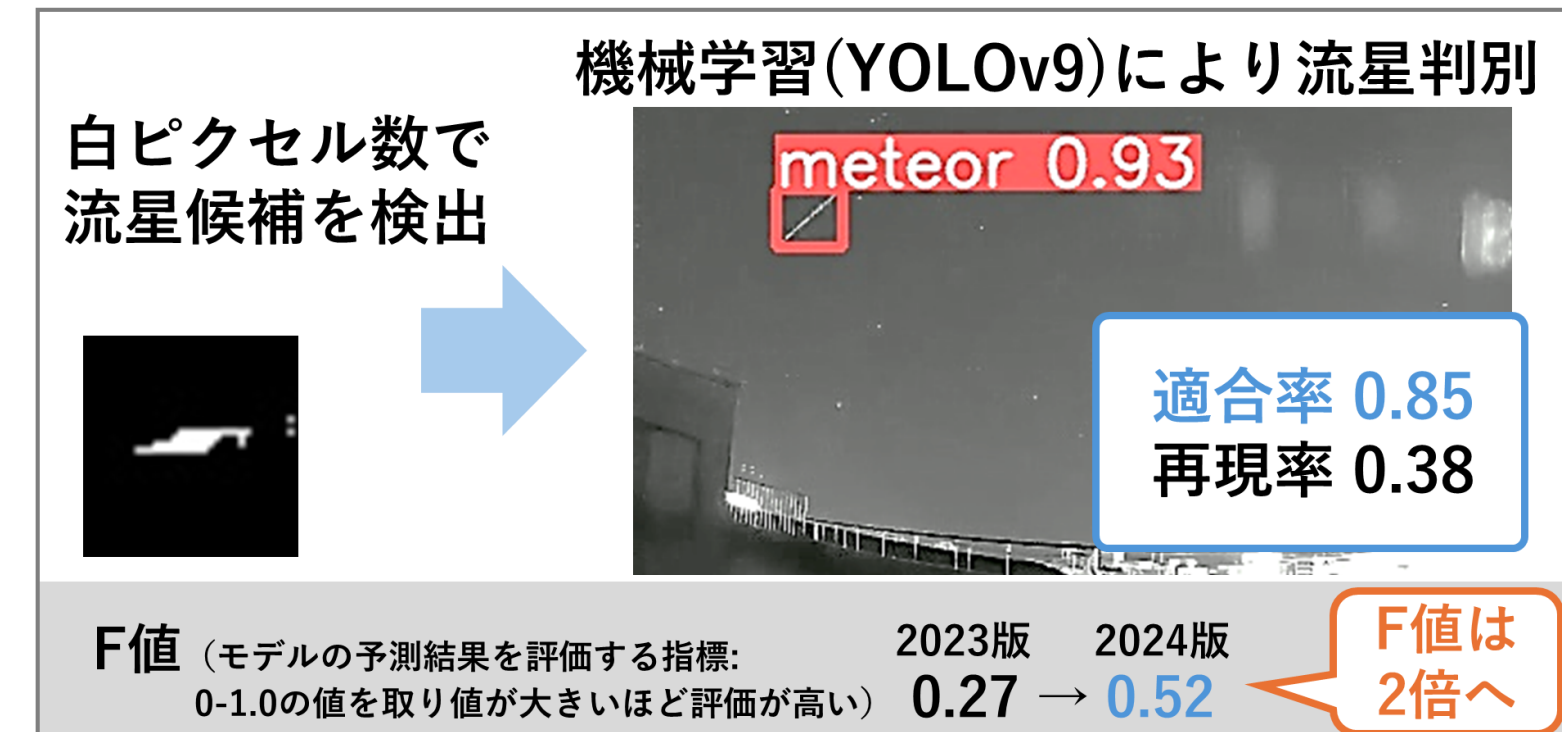


図2 ビデオ観測の検知プログラム

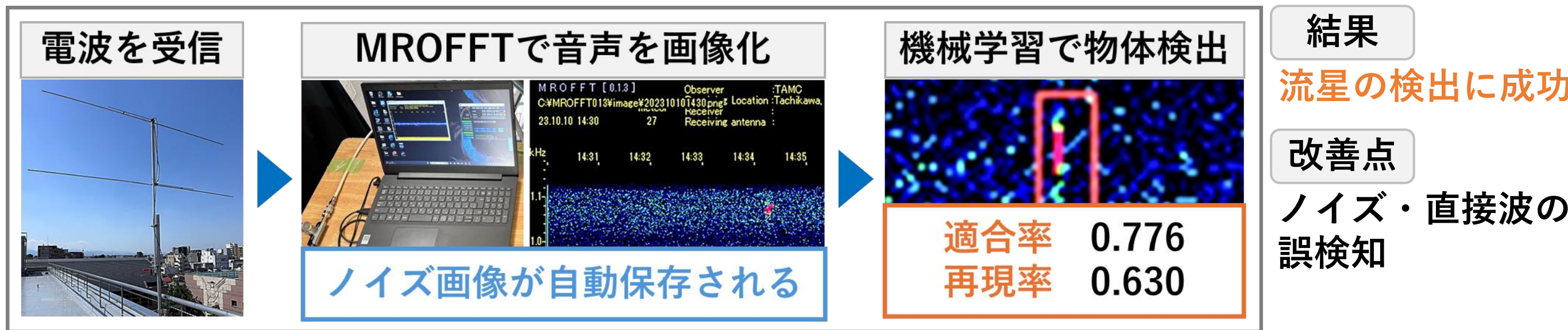
眼視観測より多くの流星を正確に捉えることに成功
検知時間を6分の1に削減(昨年比)
極端に暗い流星が捉えられなかった
→そのため再現率は低い

電波観測装置の製作と検知プログラムの開発

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、SDR及びPC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>

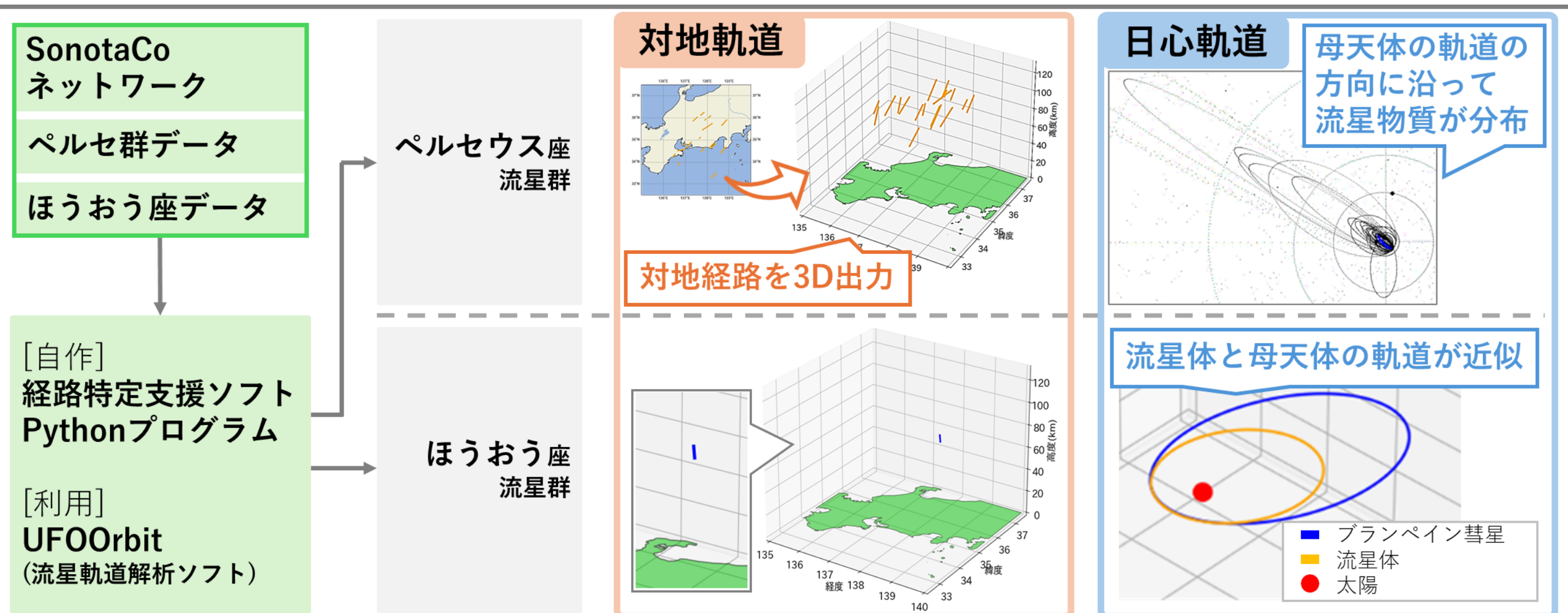
得られた電波の画像データから、**物体検出**を用いて流星を検知するプログラムを開発した(図5)。約5000枚の画像からデータセットを自作し、YOLOv8を用いて学習した。



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**。軌道長半径の差については、ダストの放出方向の違いや観測誤差が考えられる。



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。

しかし、エコーの到来方向が不明であるために極めて難しい。

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部潤一、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

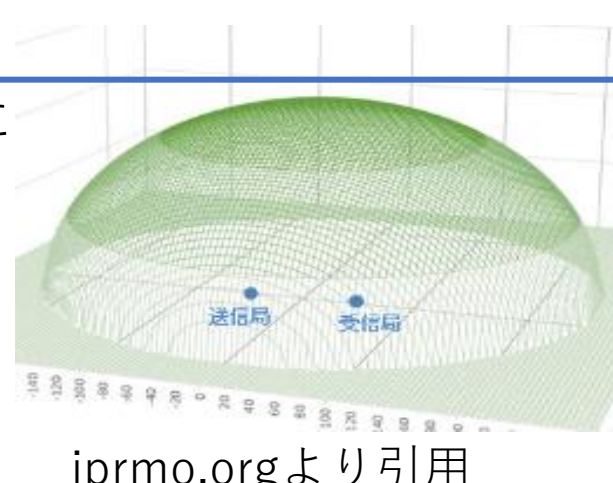
内海 (2002) によると、電波の反射領域の全体は右図のような回転楕円体になり、これについて次の連立方程式が成り立つ。 a, d, z, l, m, n にはそれぞれ以下の任意の値を代入する。

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2 - d^2} + \frac{z^2}{a^2 - d^2} = 1 \\ 2x \cdot l + \frac{2y}{a^2} \cdot m + \frac{2z}{a^2 - d^2} \cdot n = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos(90^\circ - \varphi) \\ \cos\theta \sin(90^\circ - \varphi) \\ \sin\theta \end{pmatrix}$$

θ = (輻射点高度), φ = (輻射点方位角)

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)



iprmo.orgより引用

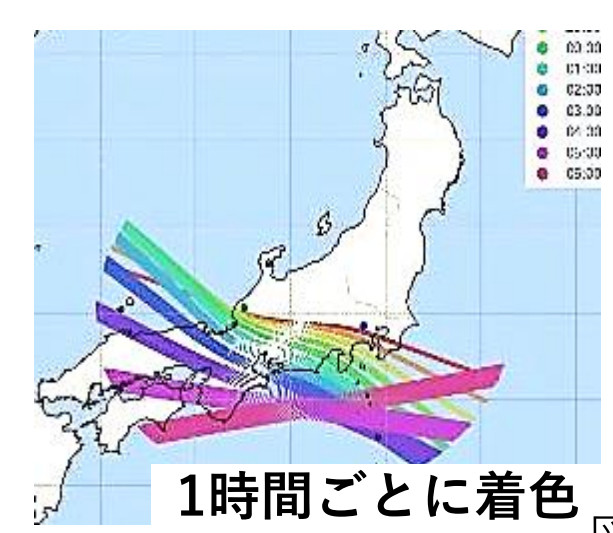
<反射領域の3Dシミュレーション>

先行研究 Excel上で反射領域を計算 ▶ 2D(平面)でしか出力できず

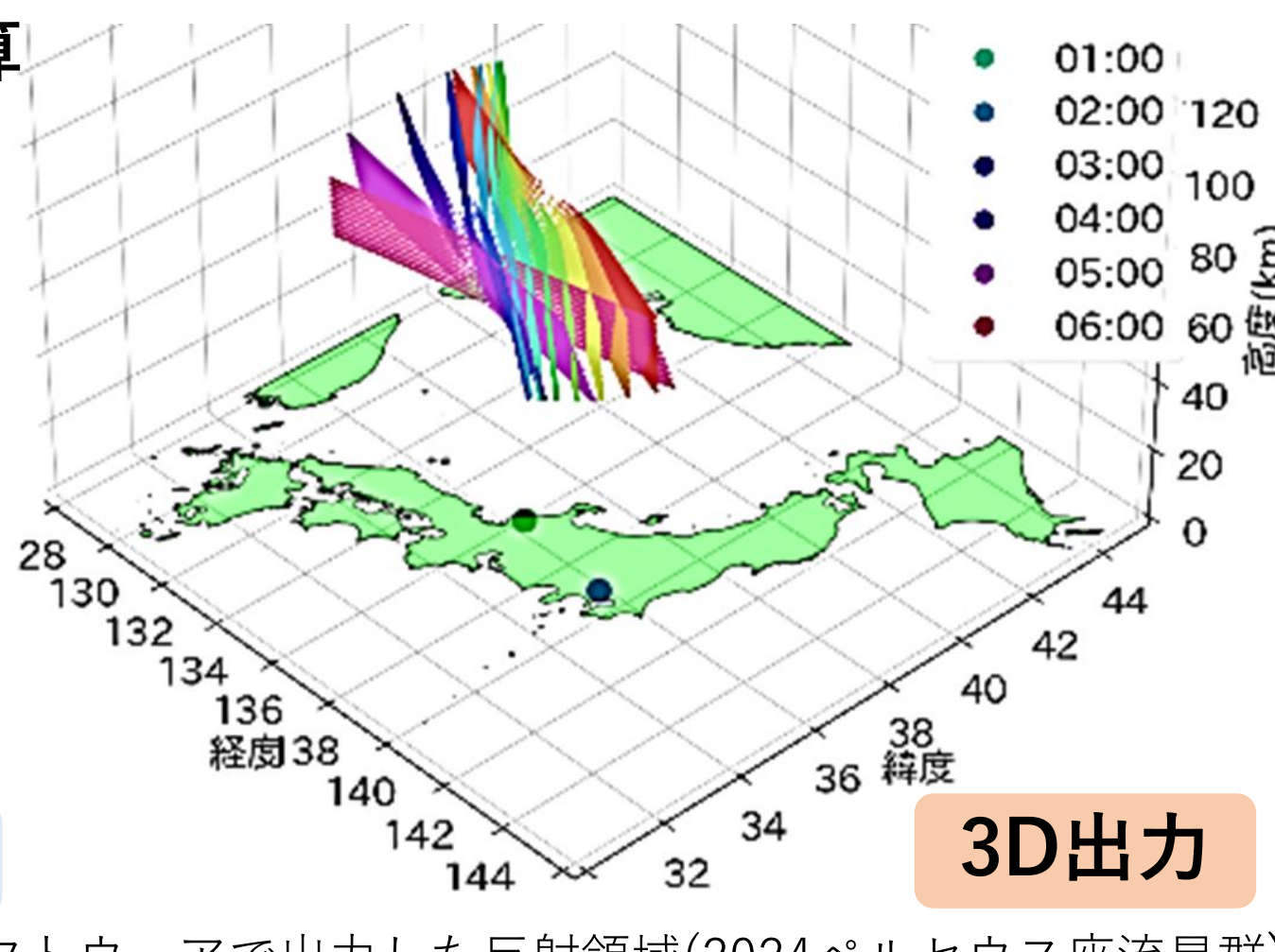
本研究 独自のPythonプログラムで計算

3D(立体)での出力も可能に

データの同定が容易になった



2D出力



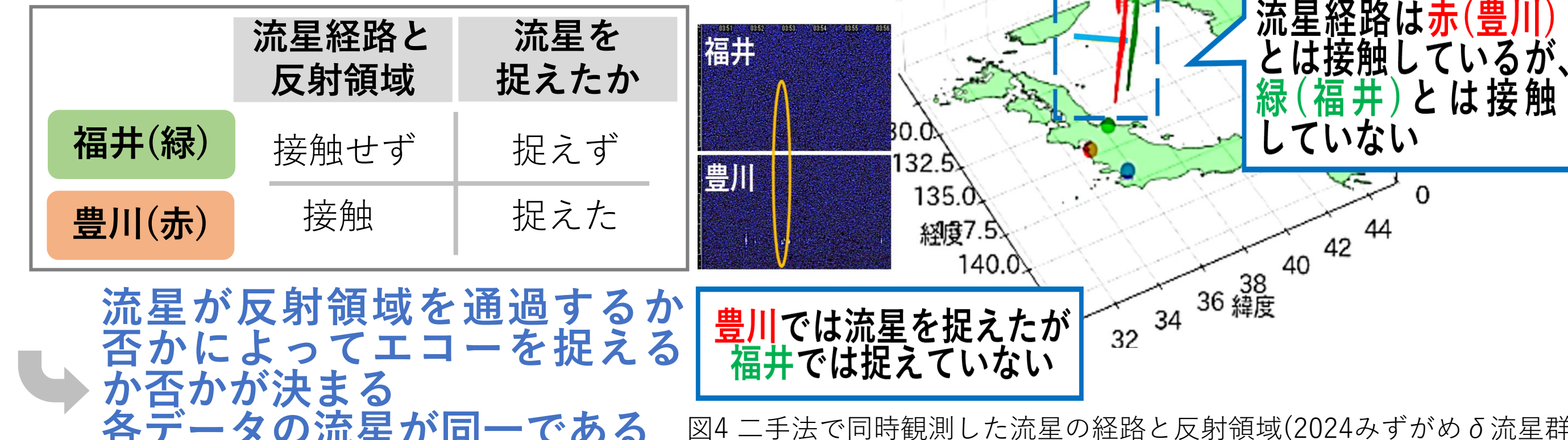
3D出力

図3 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

δ 流星群由来の流星の経路と反射領域をプロットした(図8)。



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、流星体の速度によ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、鈴木和博などによりヘッドエコーから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)

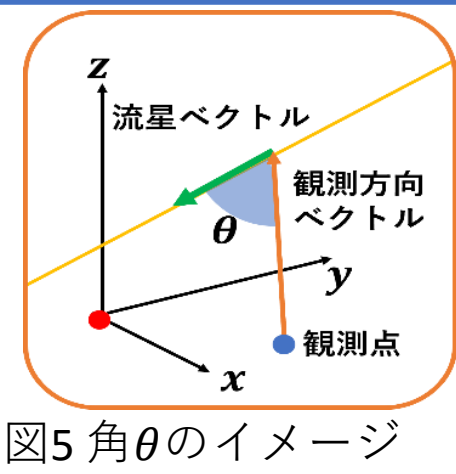


図5 角 θ のイメージ



図6 Audacityで見たヘッドエコー

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。

- ～仮定～
- ・近づく場合のドップラー効果のみを考え、ドップラーシフト(f_d)は必ず正の値とする。
- ・ドップラー効果の性質上、線分 Rx_1F_0 は流星経路に垂直であるとする。

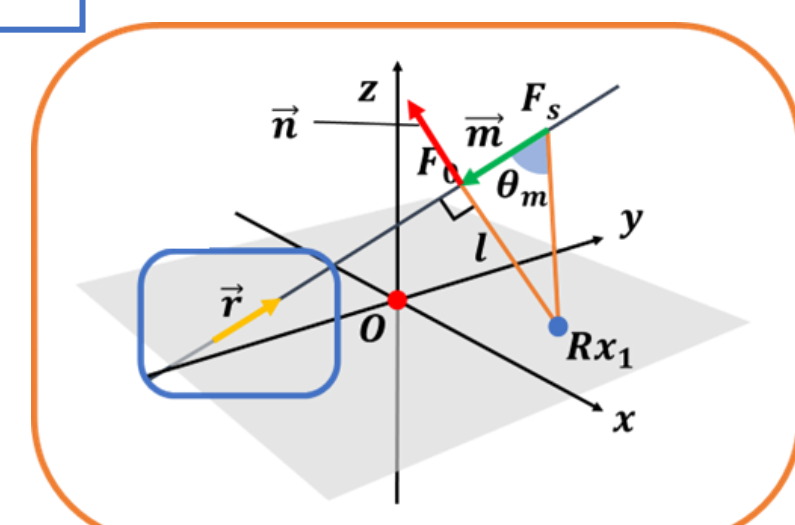


図7 流星経路のイメージ

以下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。

$$\begin{cases} (f_{0x} - R_{1x})^2 + (f_{0y} - R_{1y})^2 + f_{0z}^2 = (f_0/v_0)^2 \left\{ \left(\frac{2|v_0|f_t}{f_0c} \right)^2 - 1 \right\} \\ (f_{0x} - R_{1x}) \cos \theta_r \sin \phi + (f_{0y} - R_{1y}) \cos \theta_r \cos \phi + f_{0z} \sin \theta_r = 0 \end{cases}$$

実経路(赤)と予測経路(黄)が一致

<同時流星の実経路と予測経路>

SonotaCoネットワークのビデオ観測データからUFOorbitを用いて、輻射点高度やその方位角、速度などを求め、上の連立方程式を解いて、流星の経路を予測した(図8)。

対地速度、ドップラーシフト、継続時間、輻射点の位置から**対地経路の予測が可能!**

ビデオと電波の同時流星の同定に利用可能なのではないか

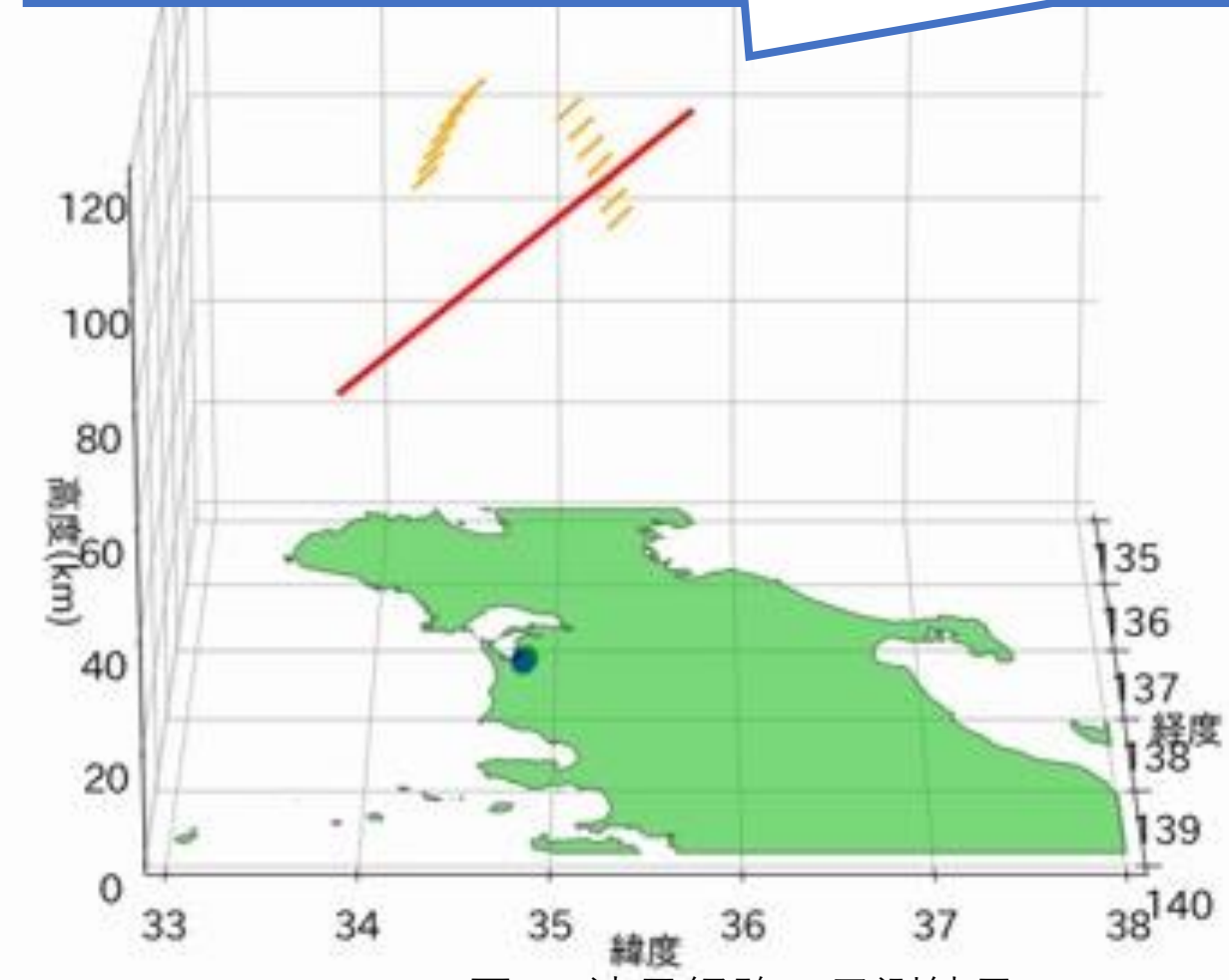


図8 流星経路の予測結果

●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流星検知システムが完成**。

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

⇒**反射領域の正確性の考察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、経路の予測に成功した**。

⇒データを収集してこの手法の妥当性を検証する。

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文氏、反射領域計算は流星電波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。

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)『視程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)mNakada. 「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. 「火球と隕石」
- 14)斎藤馨児,長沢工 (1984). 「流星Ⅰ 観測の実際」 恒星社厚生閣
- 15) AstroArts スターナビゲータ11