

小型望遠鏡を用いた スペースデブリの観測と軌道算出

福岡工業大学附属城東高等学校科学部

3年 甲斐 涼雅 青木 翼 有吉 裕哉 松中 陽路 2年 北里 虎大 梶崎 天翔

1. 動機

近年、スペースデブリ（以下デブリ）の問題が表面化し、大型望遠鏡を用いた観測が各地で行われている。しかし、静止軌道近傍デブリの観測は難しく、分かっていないことが多い。そこで、小型望遠鏡で静止軌道近傍デブリを観測することで、容易に観測ポイントを増加させることが可能なことから、観測されたデータが増え、静止軌道近傍デブリを正確に把握出来るのではないかと考えた。

2. 観測対象

本研究では、タイタン3Cトランステージというロケットから放出されたデブリを観測対象としている。タイタン3Cは、1964年にアメリカによって打ち上げられ、静止軌道上に人工衛星を運んだロケットである。1992年に静止軌道上で爆発を起こし、多数のデブリを静止軌道近傍に放出した。現在も多くの未登録デブリがあると考えられていることなどの要因から、世界一危険なデブリとして認識されている。

3. 先行研究

小型望遠鏡でタイタン3Cの未登録デブリを効率的に観測するために、未登録デブリが通過する可能性の高い架空の軌道（以下モデル軌道）を算出し、その軌道上に観測対象（以下モデルデブリ）を配置して観測を行なった。このような新たな観測方法を検討・実行することで、タイタン3Cのデブリと思われる未登録デブリの撮影に成功した。

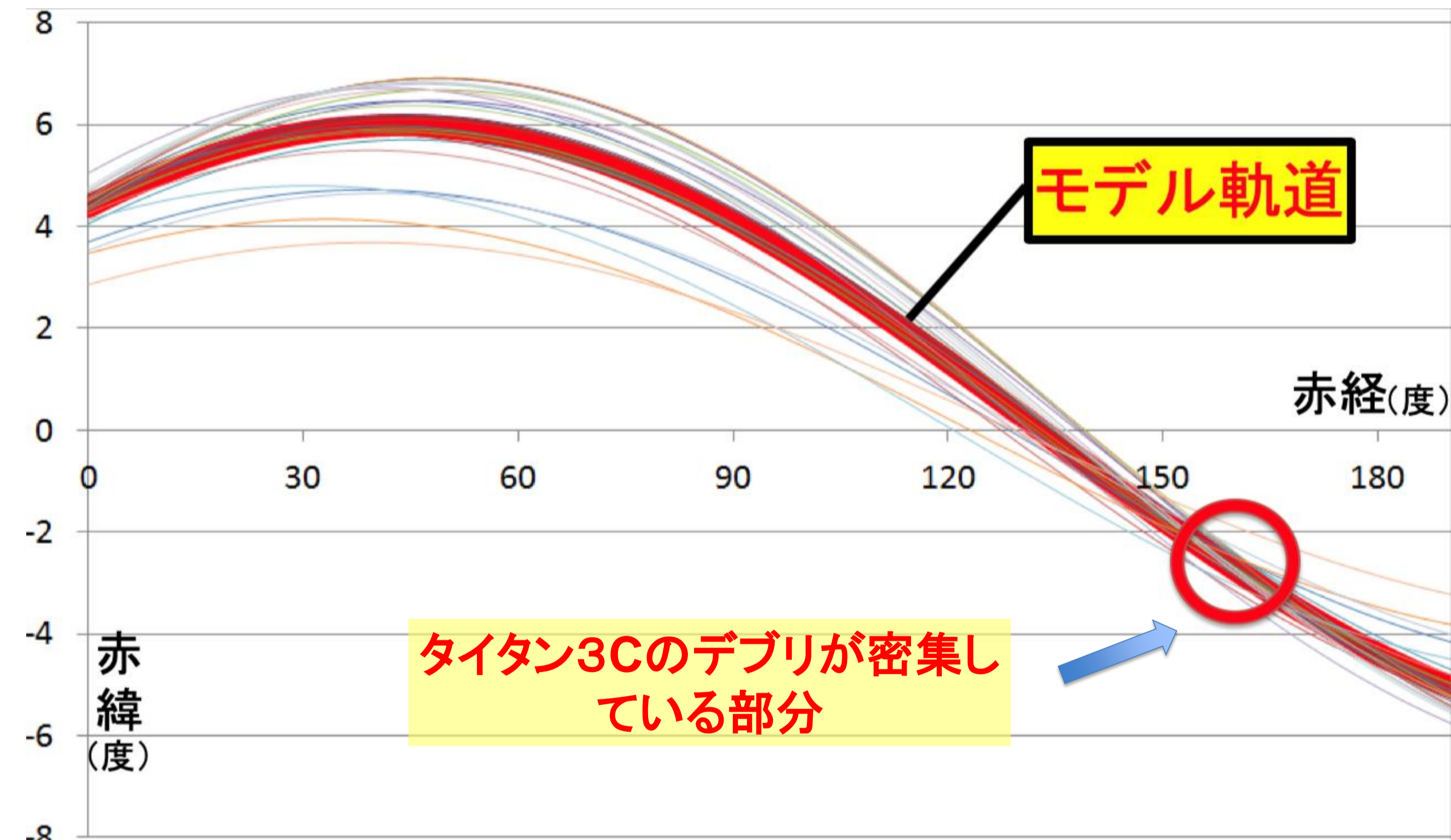


図1：既知デブリ（細線）と作成したモデル軌道（太線）

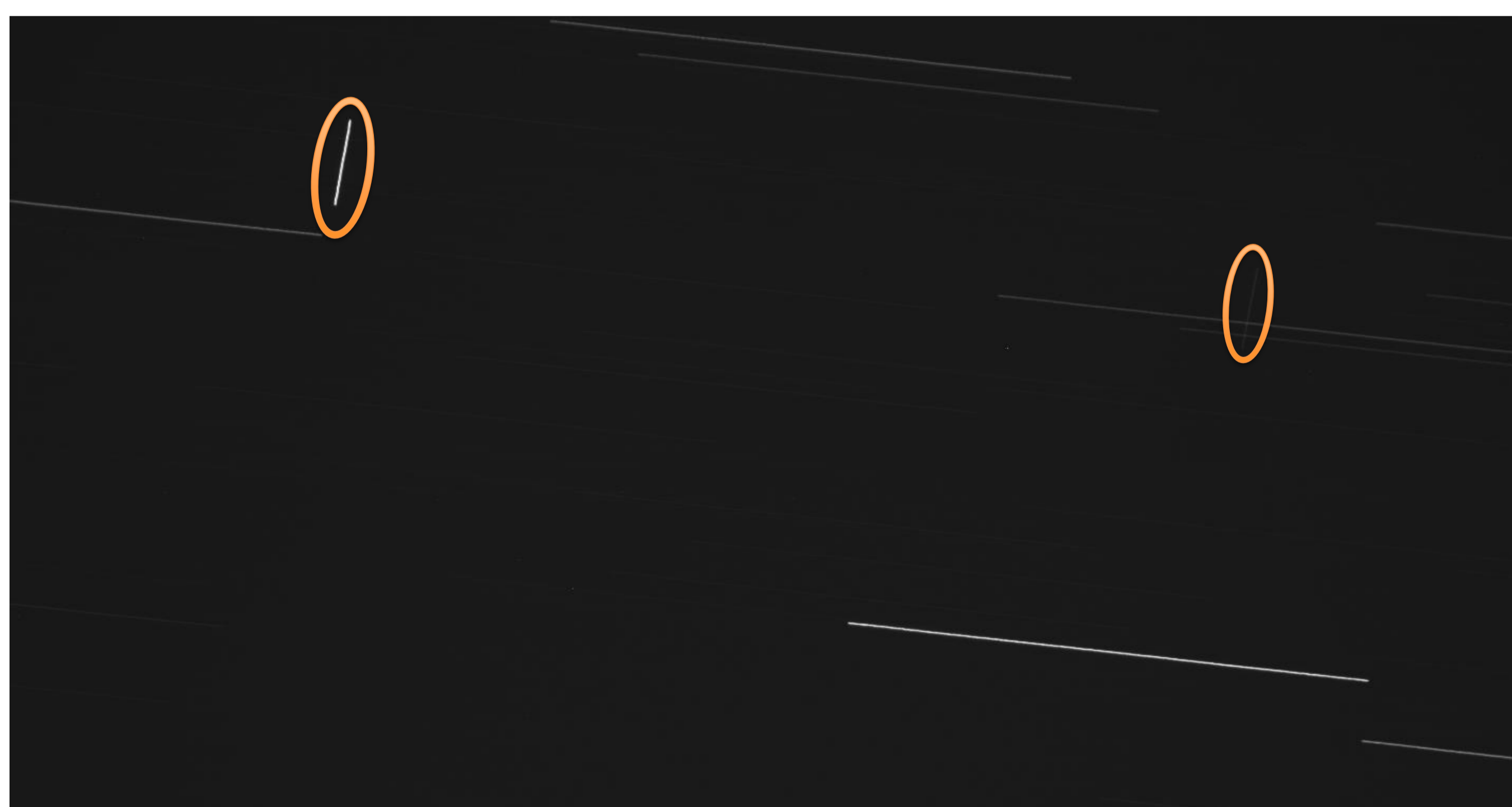


図2：モデルデブリ・モデル軌道を用いて観測した未登録デブリ

4. 研究目的

先行研究にて、未登録デブリの観測が可能になった。しかし、未登録デブリをデブリのデータベース（以下スペーストラック）に登録するためには、観測した未登録デブリの軌道6つ（軌道要素）を算出する必要がある。そのため今回の研究では、引き続き未登録デブリを観測をおこなうと共に、観測したデブリの画像から軌道を算出するための数式の構築、また、今回構築した数式を用いて、小型望遠鏡で観測したデブリの軌道を算出することを、目的とした。

5. 研究方法

A) 未登録デブリの観測

・使用機材
冷却CCDカメラ；QHY社 QHY9（830万画素）
望遠鏡；ボーグ101ED
画像処理ソフト；ステライメージ8（アストロアーツ社）
人工衛星・デブリ表示ソフト；heavensat2.4

・観測方法

1. 望遠鏡にレデューサー・CCDカメラを取り付け、作成したモデルデブリに望遠鏡を向け固定撮影を行う。
2. ステライメージ8で観測した画像の階調補正を行う。
3. 観測したデブリを未登録デブリと仮定し、追尾観測を行う。

B) デブリの軌道算出

今回の軌道算出では軌道傾斜角と昇交点赤経の2つを算出することにした。しかし、スペースデブリの軌道算出に一般的に用いられている算出数式は非常に難解なものであり、高校数学だけでは理解することができない。そこで、高校数学だけを用いた数式を構築することにした。

・算出方法

1. 観測時間の異なる2枚のデブリの画像から双方の赤経赤緯を割り出す。
2. 観測時間の異なる2種類の赤経赤緯を地球中心の赤経赤緯に変換する。
3. 変換した2種類の赤経赤緯を天球上に配置し、その2点をつなぎ合わせて軌道を算出する。

スペースデブリの軌道算出では、観測した画像からわかる「観測地点からの赤経赤緯」を「地球中心からの赤経赤緯」に変換する必要がある。

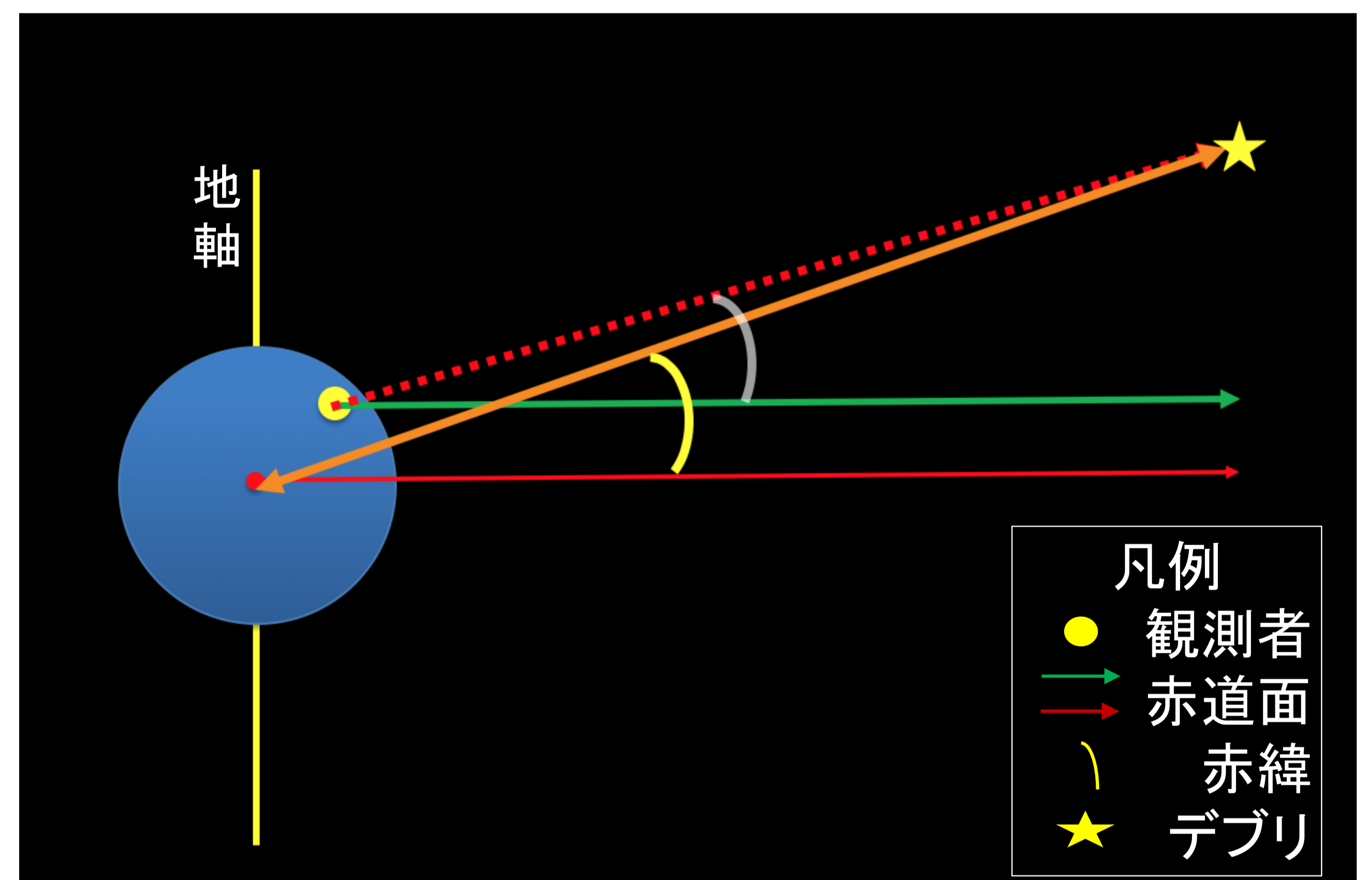


図3：赤経赤緯の視点変換(赤緯方向)

このようなスペースデブリの軌道は、一般的に大学数学を応用した数式で算出が行われているが、本研究では、赤経赤緯の変換では三角関数を用いた。また変換した赤経赤緯は、先行研究にて、軌道要素から軌道グラフを作成するために構築した数式を用いることとした。構築した数式は以下のとおりである。

地心赤経[1]

$$\frac{\text{軌道長半径}}{\sin(180^\circ - \text{地方恒星時} + \text{測心赤経})} = \frac{\text{動径}}{\sin \text{視差}}$$

$$\text{地心赤経} = \text{視差} + \text{測心赤経}$$

地心赤緯[2]

$$\text{赤道面距離} = \text{地球半径} \times \sin \text{観測地点緯度}$$

$$\text{観測者赤道面距離} = \text{水平測心距離} \times \sin \text{測心赤緯}$$

$$\text{地心赤緯} = \sin^{-1} \frac{\text{赤道面距離} + \text{観測者赤道面距離}}{\text{軌道長半径}}$$

これらの数式を用いて変換した「地球中心からの赤経赤緯」を以下の数式に代入することで、軌道傾斜角・昇交点赤経を算出する。

軌道要素[3]

$$\tan \text{地心赤緯} = \tan \text{軌道傾斜角} \times \sin(\text{地心赤経} - \text{昇交点赤経})$$

先行研究では、観測したデブリは、コンピュータを用いて同定を行っていたが、今回は観測したデブリの画像から、構築した数式を用いることで軌道を算出する。そして、算出した2つの軌道要素をスペーストラックに登録されているデブリの軌道要素と比較を行うことで、観測したデブリが、既知デブリなのか未登録デブリなのかを同定する。

また今回は軌道算出では、軌道長半径を、静止軌道の値で仮定し、今回構築した数式で、地心赤経、地心赤緯を算出を行い、その後ケプラーの第3法則を応用し、その値で軌道長半径を再び算出した。そこで算出した値を、仮定した値と比較し、その値が一致していなければ算出された値を仮置きし、もう一度算出を行い、仮置きした値と算出した値が一致するまで精査を行った。

6. 観測結果

観測では、未登録デブリと仮定したデブリを約2時間30分追尾し、時間差のある複数枚を撮影することに成功した(図5・図6)。デブリの軌道算出にはこちらの観測データを用いることにした。



観測日時: 2019年7月31日22時50分44秒 観測場所: 福岡工業大学附属城東高校屋上
露出時間: 40秒 BORG101ED+レデューサー(D=101mm、D=445mm)、QHY9冷却CCDカメラ、ビクセンSX-P赤道儀で導入後固定撮影

図5: 未登録デブリと仮定して追尾したデブリ

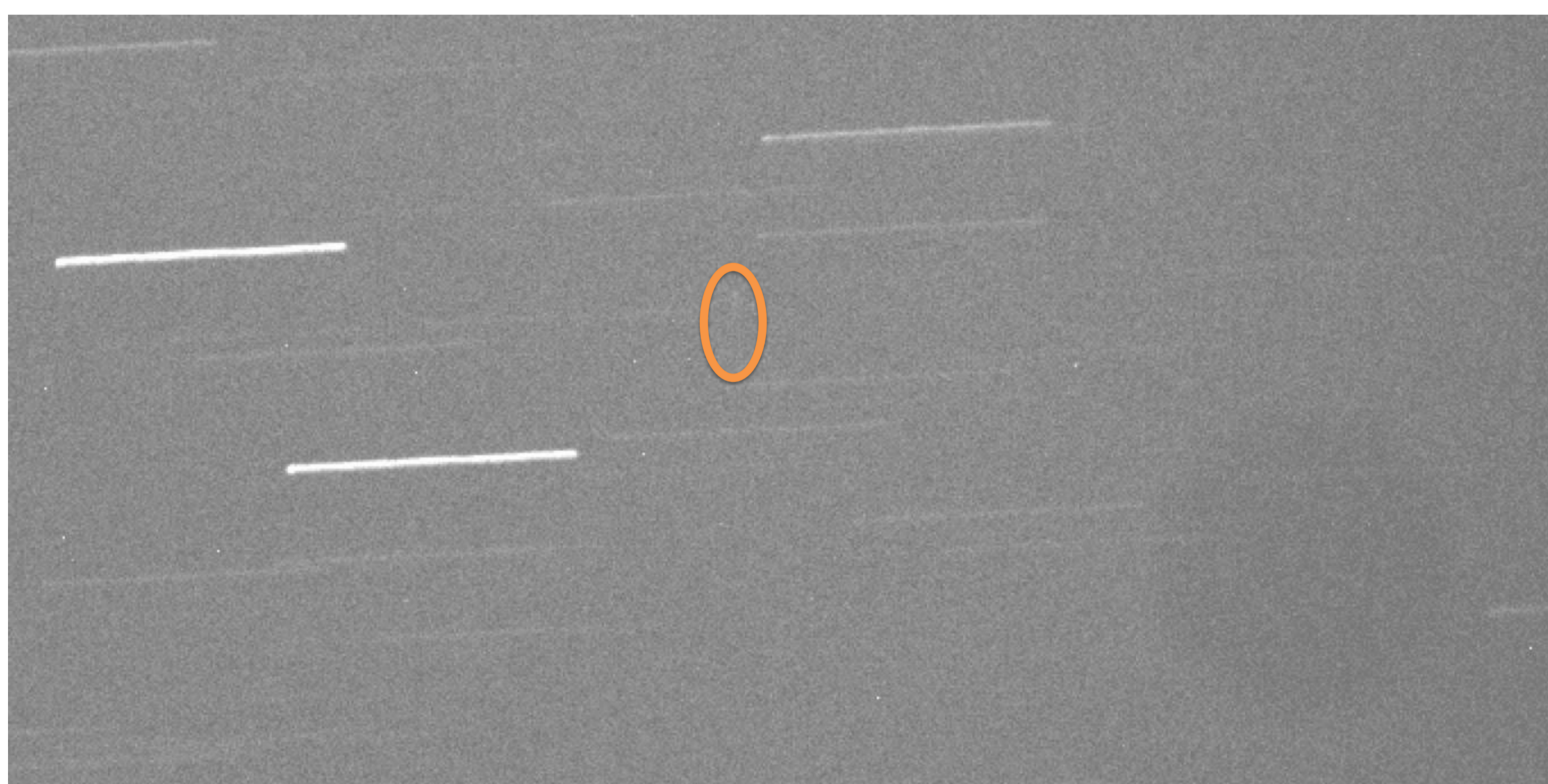


図6: 未登録デブリと仮定して追尾したデブリ(2時間後)

観測日時: 2019年8月1日1時27分38秒 観測場所: 福岡工業大学附属城東高校屋上
露出時間: 40秒 BORG101ED+レデューサー(D=101mm、D=445mm)、QHY9冷却CCDカメラ、ビクセンSX-P赤道儀で導入後固定撮影

7. 算出結果

観測結果にて観測したデブリの画像から得られる観測地点からの赤経赤緯を、構築した数式[1、2]を用いることで地球中心からの赤経赤緯に変換することに成功した(図7)。変換結果は以下のとおりである。

	1枚目補正前	1枚目補正後	2枚目補正前	2枚目補正後
赤経	323.08°	319.44°	4.17°	-0.28°
赤緯	-4.42°	0.90°	-1.05°	3.53°

表1: 観測地点からの赤経・赤緯と補正した値

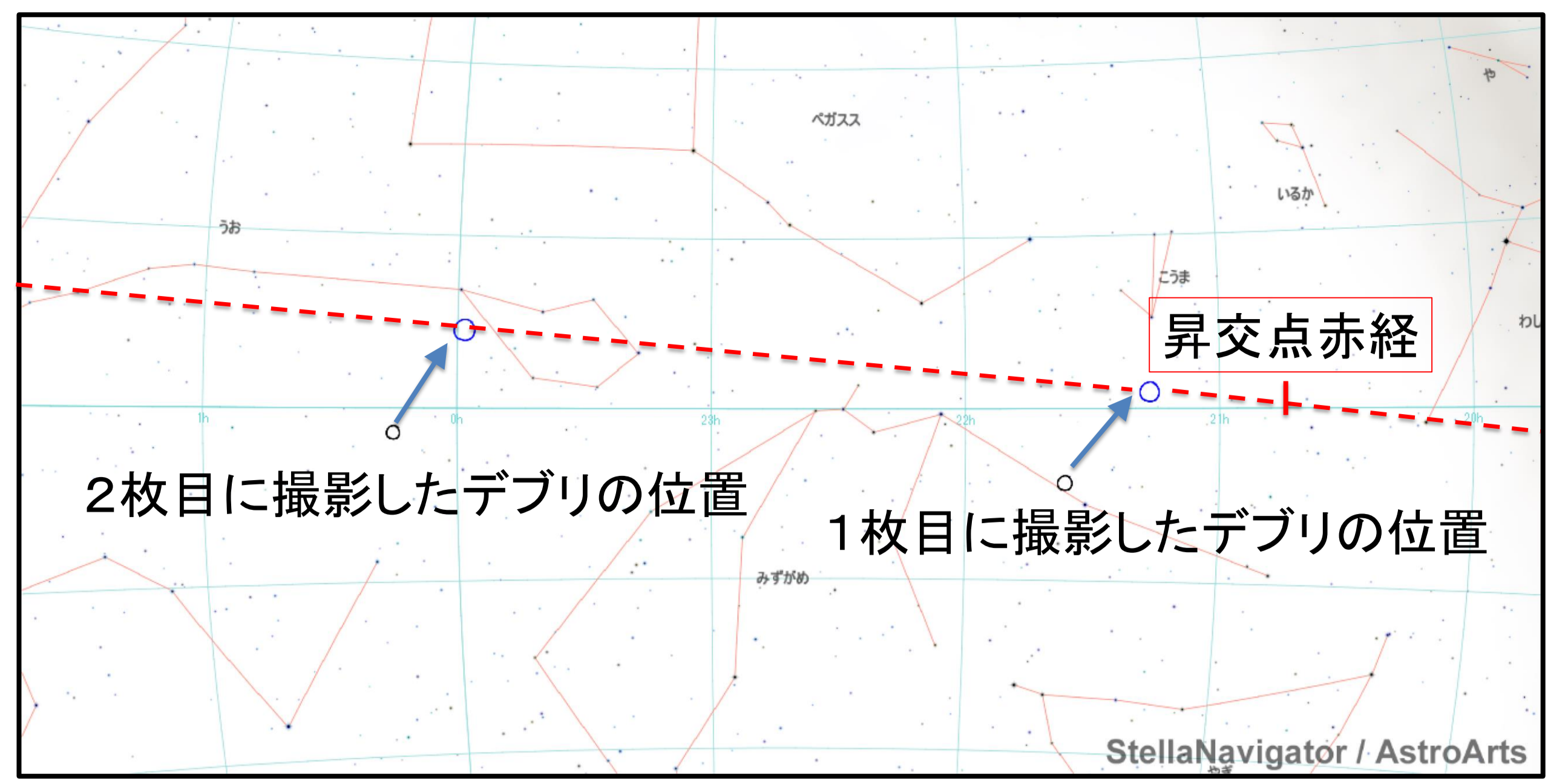


図7: 星図上に配置した変換前の位置と変換後の位置

次に、変換した赤経赤緯を、軌道要素を算出する数式[3]を用いることで軌道傾斜角・昇交点赤経を算出することに成功した。軌道の算出結果は以下のとおりである。

軌道傾斜角: 4.47° (真値4.45°)
昇交点赤経: 307.9° (真値307.9°)

このように算出した軌道をもとに、スペーストラックで同定を行なったところ、結果2において観測・追尾撮影したデブリはタイタン3Cの既知デブリ、NORAD番号3432であることがわかった。算出した軌道と3432の軌道の値は、**昇交点赤経は一致**し、軌道傾斜角は0.02°の誤差であった。

また、この算出した結果をもとに、後日観測を行ったところ、NORAD番号3432の観測に成功した。

8. 考察・結論

この結果より、モデル軌道・モデルデブリを用いた観測は、タイタン3Cのデブリの捜索に役立つと考えられ、小型望遠鏡を用いた未登録デブリの観測に最適であることがわかった。

構築した数式を用いて観測結果で観測したデブリの軌道を算出したところ、**軌道を高精度で算出することに成功**したことから、本研究で構築した**高校数学だけを用いた軌道算出の数式**は、一般的に用いられている難解な数式に代用できると考えられる。

今回追尾撮影の間隔が最大が約2時間30分で観測を行い、そこから得られたデータで計算を行ったところ算出に成功したことから、高精度な軌道計算の為には2時間30分以上の撮影はあまり効果がないと考えられる。

9. 今後の展望

今後は、モデルデブリ・モデル軌道を用いて撮影した未登録デブリの画像から、構築した数式を用いて軌道算出を行っていきたい。そして、算出した軌道をもとに、未登録デブリを継続して観測していきたい。また、他の4種類の値についても、高校数学で構築可能な数式を構築し、算出していきたい。

10. 謝辞

この研究を行うにあたって、美星天文台の元台長の綾仁一哉先生に観測のご指導を受けました。九州大学の花田俊也先生に軌道理論と観測方法のご指導をしていただきました。福岡工業大学の河村良行先生に観測機器について支援とご指導を受けました。美星スペースガードセンターの浦川聖太郎先生に画像解析と観測方法のご指導をしていただきました。佐賀天文協会の関係者の方々には観測場所の提供をしていただきました。ここに記して謝意を表します。

11. 参考文献

- ・人工衛星の軌道概論 川瀬 成一郎著 コロナ社
- ・天体の位置計算 長沢 工著 地人書館
- ・スペースデブリ 宇宙活動の持続的発展を目指して 加藤 明著 地人書館
- ・総合物理1 力と運動・熱 教研出版