

低軌道デブリの物理特性解明を目的とする
ピリカ望遠鏡を用いた観測試行

田沼 雄太

学生番号：02190103

北海道大学 理学部 地球惑星科学科

惑星宇宙グループ

指導教員：佐藤 光輝

令和5年 2月1日

要旨

スペースデブリ(宇宙ゴミ:以下、デブリ)は地球周回軌道にある人工物のことで、年々増加の一途をたどっている。2009年には、アメリカの通信衛星イリジウムと、運用を終了したロシアの人工衛星とが衝突し、2,300個を超えるデブリが発生した。デブリの地球への落下、ISSへの衝突など、発生すれば甚大な被害を及ぼす可能性が懸念されており、これらデブリの大きさ・素材・運動特性などの正確な把握と、軌道の変化の予測が必要不可欠となっている。宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、デブリによる脅威から人間、人工衛星、宇宙飛行士を守るために、デブリの軌道を正確に把握することを目的とした宇宙状況把握(SSA:Space Situational Awareness)活動に取り組んでいる。スペースデブリの観測はSSAの取り組みの一つであり、本研究はSSAに貢献することを目的としている。デブリの衝突予測や大気圏突入予測の前段階として、デブリの物理特性、すなわち表面物質や形状、運動特性を知る必要がある。Vananti et al.[2017]は静止軌道にあるデブリの表面物質を知るために光学望遠鏡で分光観測を行い、実際に人工衛星に使用されている部品の反射スペクトルと比較した。一方、Yanagisawa and Kurosaki[2012]は低軌道にあるデブリの反射光度の時間変化のみから形状や運動特性を推定した。しかし、低軌道にあるデブリの表面物質の同定は行われていない。そこで、本研究では低軌道デブリの表面物質を同定することを最終目標とし、本論文ではその前段階として低軌道デブリを大口径地上望遠鏡を用いた光学観測を実施し、反射光度の時間変化を調べる試みを行った。

本研究では、北海道大学が所有する1.6 mピリカ望遠鏡を用いて低軌道にあるデブリの光学観測を実施した。観測は2022年10月26日、27日、11月24日、26日の計4夜行い、計22個の低軌道デブリと人工衛星を撮像した。恒星や惑星、あるいは静止軌道上にあるデブリの観測と比べ、低軌道デブリは高速で視野内を移動するため、一回の観測時間は数分から十数分に限られ、さらには高精度な追尾を必要とする。追尾が成功すれば、画像内に点像が映るはずだが、低軌道デブリをピリカ望遠鏡で追尾して得られた画像のほとんどで点像は見つからなかった。

点像が確認できた画像に対して、その点像が実際に追尾したデブリであるのかを検証した。フレーム中の点像の視直径を計算し、実際の軌道高度におけるデブリの大きさを概算した結果、既存のデータを大幅に下回る数値であった。それに加えて、連続して撮像されたフレームの前後で、同じ位置に同じような点像が確認できなかったため、これらの点像は観測対象ではなく、宇宙線あるいはショットノイズの可能性が高いことがわかった。

さらに、取得したフレーム中には、度々曲線的な光跡が写り込んだ。曲線的な光

跡と恒星 BD+40 1627 の光の広がり方を調べた結果，カウント値に大きな差は見られるものの，光の広がり方自体は類似していた．したがって，これらが写った原因としては，望遠鏡の姿勢変化によって恒星像が明るく写った可能性が高いが，姿勢の変化に応じて反射光の強度が変化するデブリあるいは人工衛星によるものである可能性も残された．一方で，顕著な光度変化のなかった曲線に関しては恒星の他，姿勢が安定している人工衛星，デブリの可能性もあるため，明確な結論には至らなかった．

また，観測者から見て低軌道デブリが天球状を移動する速度に対してピリカ望遠鏡のドームの回転が追いつかず，幾度となくドームの追尾制御エラーが発生してしまい，結果的に十分な観測・解析を行うことができなかった．本研究では，ピリカ望遠鏡を用いた低軌道デブリの観測には限度があることを明らかにした．今後は静止軌道にあるデブリに着目し，それらの表面物質，実験室実験とピリカ望遠鏡を用いて推定することを志している．

目次

1	序論	5
1.1	研究背景	5
1.2	先行研究と研究目的	7
1.2.1	<i>Vananti et al.</i> [2017] のレビュー	7
1.2.2	Yanagisawa and Kurosaki[2012] のレビュー	9
1.2.3	研究目的	11
2	観測	13
2.1	観測装置	13
2.1.1	ピリカ望遠鏡	13
2.1.2	Multi-Spectral Imager	14
2.1.3	Electron Multiplying CCD(EMCCD)	15
2.2	観測手順	17
3	画像処理と解析	21
3.1	一次処理	21
3.2	解析	22
4	結果	26
4.1	観測結果	26
4.2	解析結果	31
5	考察	33
6	まとめと今後の展望	37
7	謝辞	39
8	参考文献	40

第1章

1 序論

1.1 研究背景

スペースデブリは「宇宙ゴミ」と呼ばれる、地球を周回する人工物のうち、使用されなくなった人工衛星やロケット、人工衛星とロケットの切り離しの際に分離した部品、衝突事故や破壊実験で生じた破片等を指し、それらの大きさは1mm以下のものから数メートルのものまで様々である。デブリの数は年々増加の一途をたどっており、特に地球表面からの高度が2,000 km以下の地球周回軌道である地球低軌道(LEO:Low Earth Orbit)にデブリが密集している(図1.1)。2007年、中国が史上最大規模のFengyun-1Cの衛星破壊実験(ASAT)を行い、2009年にはCOSMOS 2251とIridium 33の衝突事故が発生、さらに2021年11月15日にロシアがCOSMOS 1408のASAT実験を実施した。これらの実験・事故により、観測可能なデブリの数は20年前と比べ約二倍に上昇し(図1.1)、軌道環境の汚染は急激に加速した。

デブリの増加は、運用中の人工衛星との衝突や、地球への落下の危険性を高め、人類の社会活動にも大きな影響を与える可能性がある。これ以上デブリを増やさないためには、ロケットの再利用やデブリ回収技術の確立が必要不可欠であるが、その前段階として、デブリの高精度な軌道予測や観測が重要視されている。本研究では低軌道のデブリについて、その物理特性、すなわち、表面物質、色、形状、回転周期、回転軸の向き、アルベドの推定を目的とした観測を行った。次項ではデブリ観測における先行研究の紹介と本研究の目的について述べる。

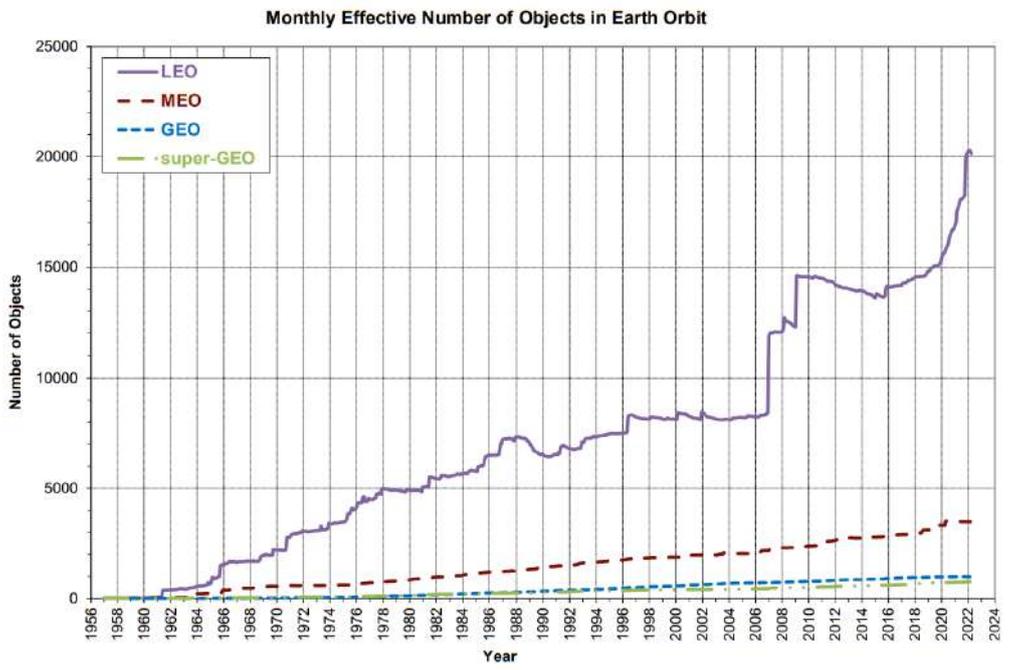
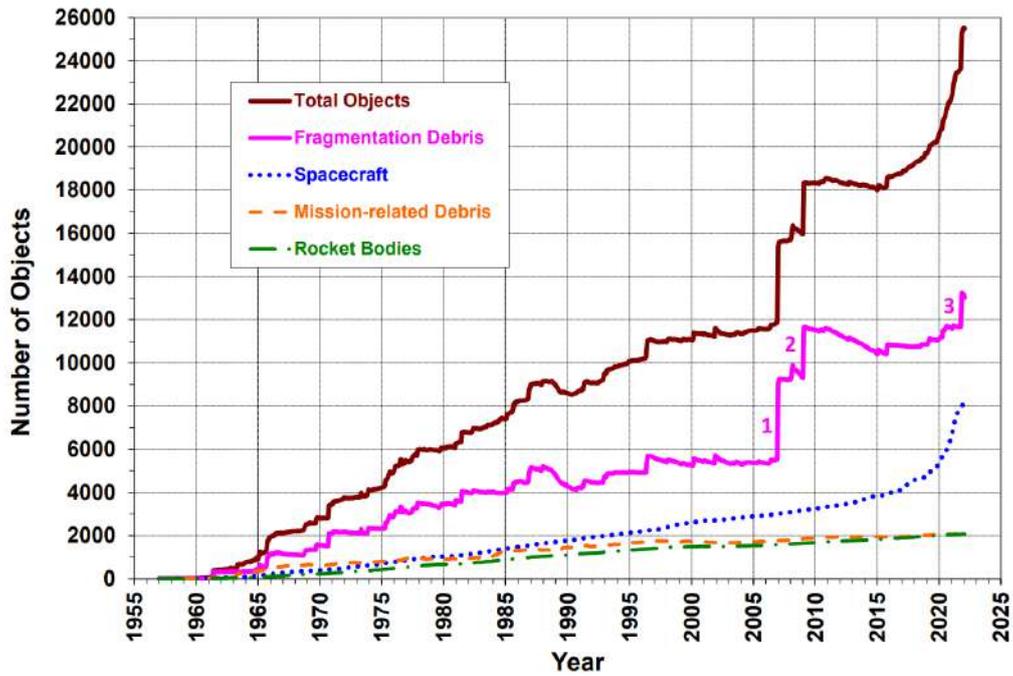


図 1.1: (上) : 2022 年 3 月 1 日時点での地球周回軌道上にある物体数の推移 . (下) : U.S.Space Surveillance Network によりカタログ化された各軌道における物体数の推移 . [NASA Orbital Debris Quarterly News, Vol.26-Issue 1 and 2, 2022]

1.2 先行研究と研究目的

1.2.1 *Vananti et al.*[2017]のレビュー

スペースデブリの物理特性を推定する研究はこれまでに数多く行われてきた。なかでも、反射スペクトルを利用したデブリの表面物質の推定 [*Vananti et al.*,2017;*Seitzer et al.*,2012] や、デブリの反射光度の変化のみから運動特性を推定した研究 [*Yanagisawa and Kurosaki*,2012] はデブリの物理特性を知る上で有効な手段として着目されている。

Vananti et al.[2017] は、静止軌道 (Geostationary Orbit:GEO) を周回しているデブリや人工衛星に対して、テネリフェ島にある ESA Space Debris Telescope(ESASDT) と呼ばれる口径 1m の光学望遠鏡を用いて分光観測を実施するとともに、人工衛星に使用されている多層断熱材 (Multi Layer Insulation:MLI) や太陽電池の反射スペクトルを実験室で計測し、観測したデブリや人工衛星の反射スペクトルと比較した。その結果、実験室で取得したデータと観測で得られたデータに類似性が見られた (図 1.2)。さらに、著者らは観測したデブリや人工衛星の反射スペクトルの特徴から、それらを大きく以下の三つのカテゴリーに分類した。

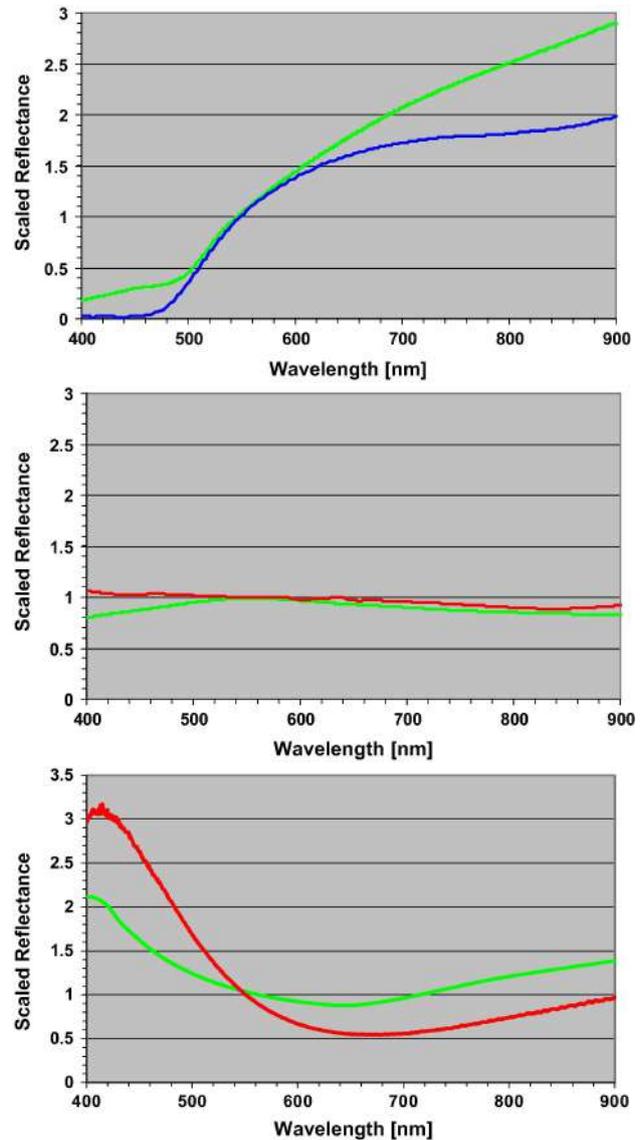


図 1.2: (上) : 'gold' MLI(青) とデブリ 84980(緑)
(中央) : 'silver' MLI(赤) とデブリ S95300(緑)
(下) : 太陽電池 (赤) と人工衛星 STTW-T2(緑)

ここで、'gold','silver' MLI は MLI をそれぞれ金色と銀色にメッキしたものを指し、太陽電池はハッブル宇宙望遠鏡から回収されたものを使用している。
[*Vananti et al.*, 2017]

- カテゴリー I: 下に凸の単調増加型
- カテゴリー II: 上に凸の単調増加型
- カテゴリー III: 短波長側で負の傾きを持ち，全体的にフラットな形

図 1.2 を例にとると，'Gold' MLI とデブリ 84980 はカテゴリー II に，太陽電池と人工衛星 STTW-T2 および太陽電池とデブリ S95300 はカテゴリー III に分類されるとした．

分光観測によって抽出された色指数は，デブリや人工衛星がどのような色であるかを知るために重要な指標の一つであり，実験室で得られたサンプルの色指数と比較することで，デブリの表面物質を推定することができる．観測した対象のうち，高い AMR(Area-to-Mass Ratio) を示すデブリに対して色指数を抽出した結果，先で分類したカテゴリーが明確に現れることが示された (図 1.3) ． AMR はある物体の単位質量あたりの面積を表し，ここで言う高い AMR の値とは $0.5 \text{ m}^2/\text{kg}$ 以上である．

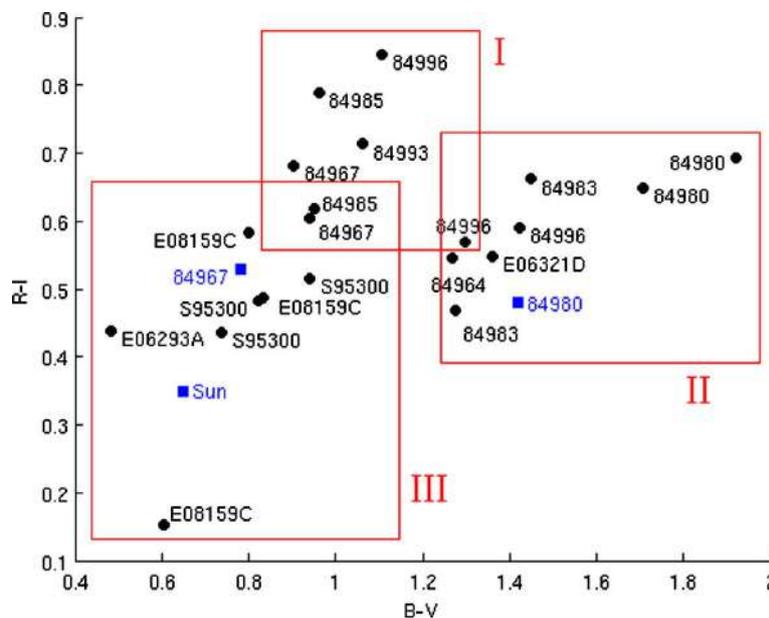


図 1.3: 横軸 B-V, 縦軸 R-I とした，高 AMR($>0.5\text{m}^2/\text{kg}$) のデブリが示す色指数． I,II,III は先述した反射スペクトルのカテゴリー [Vananti et al., 2017]

1.2.2 Yanagisawa and Kurosaki[2012] のレビュー

1.1章で述べた通り，地球周回軌道に存在するスペースデブリのうち，その約80%が低軌道を周回している．Yanagisawa and Kurosaki[2012] は三軸経緯儀に35cm シュミットカセグレン望遠鏡を積載して低軌道デブリの追尾観測を行い，反射光度の時間変化のみから低軌道デブリの三軸不等楕円体を仮定した際の軸比，天球上の回転軸方向，構成物質に関するパラメータ，回転周期，歳差運動に関するパラメータを3つの異なるモデルで導出することに成功した．いくつかのデブリを観測した結果，COSMOS 2082 Rocket Body は特に顕著な光度変化を示し，このデブリについて観測を行った．なお，COSMOS 2082 Rocket Body は国際認識番号1990-46B，遠地点距離855km，近地点距離834km，軌道傾斜角70°の軌道要素をもつ二段目のロケットである．

(i) 三軸不等楕円体モデル

デブリの反射光度は観測者の視線方向とデブリの回転軸方向のなす角や位相角によって変化する(図1.4)．各パラメータは光度振幅法[Zappalà,1980]と最小二乗法を用いて導出され，実際に計算で使われる，位相角を考慮した光度振幅比は(1.1)式で，また最小二乗誤差は(1.2)式で表される．

$$A_{real} = \frac{\sqrt{c^2 + (b^2 - c^2)(lx + my + nz)^2}}{b\sqrt{c^2 + (1 - c^2)(lx + my + nz)^2}} \quad (1.1)$$

$$Error = \sum_{i=1}^{17} (A_{obs.i} - A_{real.i})^2 \quad (1.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a, b, c : \text{三軸不等楕円体の軸比 } (a \geq b \geq c) \\ x, y, z : \text{観測者の視線方向の単位ベクトル} \\ l, m, n : \text{デブリの回転軸方向の単位ベクトル} \\ M : \text{デブリの構成物質に関するパラメータ} \\ \alpha : \text{位相角} \end{array} \right.$$

観測で得られた光度変化からランダムに17点を選び，(1.2)式の最小二乗法と(1.1)式を用いてCOSMOS 2802の回転軸方向の赤経，赤緯，三軸不等楕円体の軸比，デブリの構成物質に関するパラメータを導出したが，回転軸の方向の誤差が大きく，デブリは同時に別の回転運動を行っていることが示唆された．

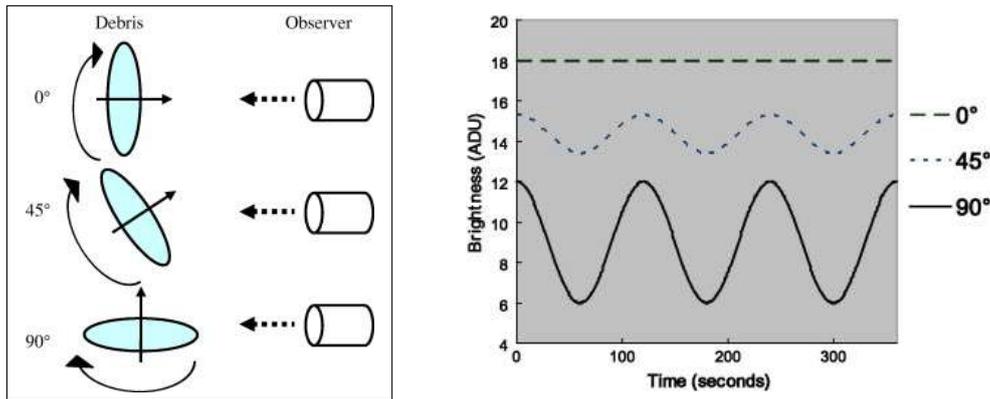


図 1.4: 左：デブリの回転軸と観測者の視線方向の関係.
右：それぞれのなす角におけるデブリの反射光度の
変化 [Yanagisawa and Kurosaki, 2012] .

(ii) 歳差運動+三軸不等楕円体モデル

(i) に加えて歳差運動を考慮したこのモデルでは，デブリの回転軸方向 (l, m, n) と回転軸の赤経・赤緯を (1.3) のように設定し直した． $R.A._0$ ， $Dec._0$ は歳差運動に関する回転軸の方向， D は歳差運動の振幅， β は定数である．

$$\begin{aligned}
 R.A. &= R.A._0 + D \sin(2\pi t/T + \beta) / \cos(Dec.) \\
 Dec. &= Dec._0 + D \cos(2\pi t/T) + \beta \\
 l &= \cos(R.A.) \cos(Dec.) \\
 m &= \sin(R.A.) \cos(Dec.) \\
 n &= \sin(Dec.)
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

(1.3) 式に対して (1.2) 式を適用すると，計算結果は (i) と比較して誤差の大きさは約 70% 軽減され，COSMOS2082 が主軸周りの回転運動のみならず，歳差運動も同時に行っている可能性が高いとした．

(iii) 円筒形+歳差運動+アルベドモデル

デブリの反射光度はその表面の構成物質の反射率，すなわちアルベドに依存するため，このパラメータを無視することはできない．(iii) のモデルは，COSMOS 2082 がロケットの二段目であることから，デブリが円筒形であるとして側面に対する底面および上面のアルベド比を R で表したとき，(1.4) 式と最小二乗法を用いて各パラメータを導出した．結果的に歳差運動の中心座標と振幅，そして歳差周期の各値の誤差は (ii) よりも小さくなっている (表 1.1) ．

$$A_{real} = (1 + M\alpha) \frac{1}{\sin\theta + 0.25\pi R d \cos\theta} \quad (1.4)$$

表 1.1: 計算結果 [Yanagisawa and Kurosaki, 2012]

	(i) 三軸不等楕円体	(ii) 歳差+三軸不等楕円体	(iii) 円筒+歳差+アルベド
赤経 : R.A.(R.A. ₀)	305.8 ^{+37.0} _{-37.1}	302.9 ^{+8.46} _{-6.66}	301.6 ^{+5.16} _{-6.03}
赤緯 : Dec.(Dec. ₀)	2.6 ^{+24.8} _{-24.1}	5.4 ^{+6.00} _{-5.61}	7.3 ^{+3.75} _{-4.11}
振幅 : D		30.5 ^{+6.84} _{-7.08}	29.5 ^{+6.87} _{-5.73}
周期 [sec] : T	41.0 ^{+0.68} _{-0.68} (主軸)	1764.0 ^{+0.14} _{-0.14} (歳差)	1764.0 ^{+0.07} _{-0.07} (歳差)
軸比 (a=1) : b	0.18 ^{+0.61} _{-0.06}	0.18 ^{+0.030} _{-0.027}	
: c	0.18 ^{+0.19} _{-0.14}	0.18 ^{+0.153} _{-0.102}	
構成物質定数 [deg ⁻¹] : M	0.05 ^{+0.018} _{-0.017}	0.043 ^{+0.0027} _{-0.0027}	0.056 ^{+0.0051} _{-0.0051}

これらの解析から，著者らは (iii) のモデルが最もよく COSMOS 2082 の運動特性を表していると結論づけた．しかし，軌道上のデブリは形状が未知であるものがほとんどであるため，今回のようなデブリの形に即したモデルを最初から作成することは困難である．したがって，未知のデブリに関しては，第一近似として (i) の三軸不等楕円体モデルが有用であるとしたうえで，このモデルでどの程度までデブリの運動を正確に再現できるかを知ることを課題として挙げている．

1.2.3 研究目的

スペースデブリは高度 2,000km 以下の低軌道に集中しており，地球上への落下，国際宇宙ステーション (ISS) をはじめとした人工衛星への衝突が危惧されている．地

球上への落下やデブリを回収する場合，そのデブリがどのような回転運動をしていて，どのような素材でできているのかを知ることは，人類の地球上あるいは宇宙空間での活動の安全を確保する上で重要であり，同時に宇宙環境の改善に対しても有用であるといえる．

本研究では，静止軌道のような遠方にあるデブリではなく，より問題視されている低軌道デブリに着目して，その物理特性を解明することを目的としている．先に述べたとおり，Vananti et al.[2017]は静止軌道のデブリについて表面物質の同定を行った．しかし，その一方で低軌道デブリに対して物質同定を行った研究は見受けられなかったため，これを研究の最終目標とした．本研究ではその準備として，北海道大学大学院理学研究院が所有するピリカ望遠鏡と観測装置を用いて低軌道デブリを観測し，低軌道デブリの反射光度の時間変化を導出することを試みた．

第2章

2 観測

2.1 観測装置

2.1.1 ピリカ望遠鏡

ピリカ望遠鏡は北海道大学大学院理学研究院・附属天文台の所有する、主鏡口径 1.6 m の光学望遠鏡であり、北海道大学のキャンパスがある札幌市から北北東に約 220 km の場所に位置する。2010 年 3 月に完成したピリカ望遠鏡は同年 12 月にファーストライトを迎え、これまで太陽系内の惑星を中心に観測が行われてきた。冬季間の降雪の影響を受けるものの、シーイングサイズは平均 1.8" で 6 月に梅雨がないという利点がある。図 2.1 にピリカ望遠鏡と附属天文台の外観、表 2.1 にピリカ望遠鏡の仕様を記述する。



図 2.1: 左: 名寄市の位置 (google earth より) . 右: 附属天文台の外観 [Watanabe et al.,2012]

表 2.1: ピリカ望遠鏡の詳細

全体光学系	
位置	44°22' N, 142°28' E
標高	151 m
形式	リッチークレチアン
焦点	カセグレン
架台	経緯台
主鏡	
-有効径	1600 mm
-合成焦点距離	19237.7 mm(F/12.0)

2.1.2 Multi-Spectral Imager

ピリカ望遠鏡のカセグレン焦点に搭載されている Multi-Spectral Imager(MSI) は北海道大学大学院理学院惑星宇宙グループによって開発され、可視近赤外域の撮像が可能なイメージャである。この MSI には VIS(Varispec VIS-10-HC-20) と SNIR(Varispec SNIR-10-HC-20)、2つの液晶波長可変フィルター (LCTF:Liquid Crystal Tunable Filter) をもち、可視ユニット (VIS) では 400-720nm、近赤外ユニット (SNIR) では 650-1100nm の波長域の撮像が可能である。そのほか、ナローバンドフィルター及びブロードバンドフィルターも搭載されているが、本研究ではデブリの反射光度のみに着目するため、分光は行わず、基本的にフィルターを使用せずに観測を行った。図 2.2 に MSI の外観を、表 2.2 に MSI の詳細を示す。



図 2.2: MSI の外観 [Watanabe et al.,2012]

2.1.3 Electron Multiplying CCD(EMCCD)

一方で, MSIには浜松ホトニクス製の電子増増型 CCD(Electron Multiplying CCD:EMCCD), C9100-13 を搭載しており, LCTF と合わせて短時間での多波長撮像が可能である. EMCCD カメラはペルチェ素子により -65 ± 0.03 °C に冷却され, CCD カメラ特有のダークノイズを低減している(図 2.3). さらに裏面照射型 CCD は従来の CCD とは異なり, 受光面が配線層よりも上部に構成されており, 光が配線層を通過しないため, 低ノイズかつ高感度を実現している.

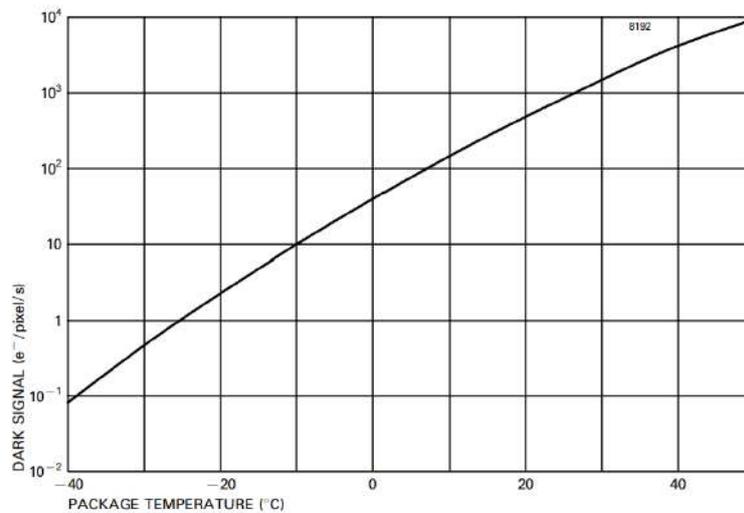


図 2.3: ペルチェ素子による冷却温度とダークノイズの相関 [cf.Hamamatsu Photonics catalog]

表 2.2: MSI の詳細 [Watanabe et al.,2012]

波長域	360–1050 nm
視野	
-通常撮像モード	$3.3' \times 3.3' (0.389 \text{ arcsec pixel}^{-1})$
フィルター	
-LCTF	CRi Varispec VIS-10: 400–720nm, $\Delta\lambda \sim 10\text{nm}(@650\text{nm})$, CRi Varispec SNIR-10: 650–1100nm, $\Delta\lambda \sim 10\text{nm}(@900\text{nm})$
-狭帯域フィルター	360, 365, 370, 380, 390 nm ($\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$), $\text{H}\alpha$ ($\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$)
-広帯域フィルター	Johnson-Cousins U, B, V, R, I
CCD カメラ	Hamamatsu Photonics C9100-13 (e2v CCD97 背面照射型電子増 CCD)
センサーサイズ	$512 \times 512 \text{ pixel}$ (Pixel size: $16 \times 16 \mu\text{m}$)
読み出し形式	EMCCD モード, 通常 CCD モード
ピクセルクロックレート	11 MHz (EMCCD モードのみ), 0.69 MHz, 2.75 MHz
最大フレームレート (フルフレーム時)	$31.9 \text{ frames s}^{-1}$ (EMCCD モード時), 2 frames s^{-1} (通常 CCD モード時)
最小露光時間 (フルフレーム時)	0.031 s (EMCCD モード時), 0.488 s (通常 CCD モード時)
CCD 冷却方式・温度	空冷 (ペルチェ素子) ・ -65°C
外形サイズ	$500 \text{ (W)} \times 450 \text{ (D)} \times 280 \text{ (H)} \text{ mm}$ (筐体のみ) $995 \text{ (W)} \times 464 \text{ (D)} \times 333 \text{ (H)} \text{ mm}$ (カメラと電子部品含む)
重量	50 kg

2.2 観測手順

はじめに、Two Line Element(TLE) と呼ばれる人工衛星やスペースデブリの軌道要素に関するデータについて紹介する。TLE データは米国宇宙監視ネットワーク (SSN : Space Surveillance Network) で管理されており、軌道計算用アルゴリズム SGP4 を用いて導出される。その計算結果は、ISS の TLE データを例に取ると図 2.4 のように 0-9 の数字、A-Z の大文字、ピリオド、スペース、プラスとマイナスの記号のみで表される。各要素の意味については表 2.4 を参照のこと。また、SGP4 で抽出された TLE データは衛星の進行方向に対して 1-1.5 km 程度の誤差が生じていると考えられており、日数が経過するごとにその誤差は大きくなる [Aida and Kirschner, 2013]。つまり、高度 400 km のデブリに対して最大 15' の軌道誤差が生じるということである。したがって、TLE データは必ずしも正確というわけではないことに注意が必要である。

```
1 25544U 98067A 23020.03323145 .00018967 00000-0 34109-3 0 9999
2 25544 51.6439 342.3840 0005033 253.9974 225.0575 15.49860639378818
```

図 2.4: 2023 年 1 月 20 日正午時点の ISS の TLE データ (Space-Track.Org より)

ここからは低軌道デブリの具体的な観測方法について、(1) 観測する低軌道デブリのリストアップと TLE データの取得、(2) 低軌道デブリの観測可否判断、(3) ピリカ望遠鏡での追尾、以上 3 つに分けて説明する。

(1) 観測する低軌道デブリのリストアップと TLE の入手方法

観測する低軌道デブリのリストアップおよび TLE データの取得には Space-Track.org を使用した (図 2.5)。Space-Track は運用中の人工衛星だけでなくデブリの TLE を取得することができ、2023 年 1 月 20 日現在で 55,268 個が登録されている。本研究の対象は低軌道デブリであるので、高度 2,000 km 以下のものをピックアップし、さらにレーダー反射断面積 (RCS : Radar Cross-Section) が 'Large ($\geq 1\text{m}^2$)' のものを選んだ。先で述べたように TLE データは日数が経過するほど精度が悪くなるため、直近で更新されていないものは使用せず、最新のデータを使用することを心がけた。

表 2.3: TLE データ各要素の説明

Line1

桁	説明
01	行番号
03-07	衛星カタログ番号
08	秘密区分 (U は Unclassified , 公開されているものはすべて U)
10-11	国際識別番号 (打ち上げ年の下二桁)
12-14	国際識別番号 (打ち上げ年における打ち上げ数)
15-17	国際識別番号 (一回の打ち上げで生じた分離部の分類 , A,B,..., AA,AB,...,AAA,AAB,...)
19-32	元期
34-43	平均運動の 1 次微分値
45-52	平均運動の 2 次微分値
54-61	大気抵抗係数項
63	軌道計算モデル (0 は SGP4/SDP4 を示す)
65-68	要素項
69	チェックサム (行のすべての数字を足し合わせ , それらを 10 で割った余り . 文字と空白 , プラス記号はカウントせず , マイナス記号のみ 1 をカウント)

Line2

桁	説明
01	行番号
03-07	衛星カタログ番号
09-16	軌道傾斜角
18-25	昇交点赤経
27-33	離心率 (小数点以下を表示)
35-42	近地点引数
44-51	平均近点離角
53-63	平均運動 (回/日)
64-68	元期での周回数 (回)
69	チェックサム (行のすべての数字を足し合わせ , それらを 10 で割った余り . 文字と空白 , プラス記号はカウントせず , マイナス記号のみ 1 をカウント)

SATELLITE CATALOG

Show 10 entries Search All Columns:

NORAD CAT ID	SATNAME	INTLDES	TYPE	COUNTRY	LAUNCH	SITE	DECAY	PERIOD	INCL	APOGEE	PERIGEE	RCS	LATEST ELSEY
1	SL-1 R/B	1957-001A	ROCKET BODY	CIS	1957-10-04	TTMTR	1957-12-01	96.19	65.19	908	214	LARGE	TLE CMM
2	SPUTNIK 1	1957-001B	PAYLOAD	CIS	1957-10-04	TTMTR	1958-01-03	96.10	65.00	1089	64		TLE CMM
3	SPUTNIK 2	1957-002A	PAYLOAD	CIS	1957-11-03	TTMTR	1958-04-14	103.74	65.33	1609	211	SMALL	TLE CMM
4	EXPLORER 1	1958-001A	PAYLOAD	US	1958-02-01	AFETR	1970-03-31	86.48	33.15	215	183		TLE CMM
5	VANGUARD 1	1958-002B	PAYLOAD	US	1958-03-17	AFETR		132.71	34.25	3631	649	SMALL	TLE CMM
6	EXPLORER 3	1958-003A	PAYLOAD	US	1958-03-26	AFETR	1958-06-28	103.60	33.50	1739	117		TLE CMM
7	SL-1 R/B	1958-004A	ROCKET BODY	CIS	1958-05-15	TTMTR	1958-12-03	102.74	65.14	1571	206		TLE CMM
8	SPUTNIK 3	1958-004B	PAYLOAD	CIS	1958-05-15	TTMTR	1960-04-06	88.43	65.06	255	139	LARGE	TLE CMM
9	EXPLORER 4	1958-005A	PAYLOAD	US	1958-07-26	AFETR	1959-10-23	92.81	50.25	585	236		TLE CMM
10	SCORE	1958-006A	PAYLOAD	US	1958-12-16	AFETR	1959-01-21	96.21	32.29	1187	159		TLE CMM

Showing 1 to 10 of 55,264 entries

Country Legend Launch-Site Legend RCS Legend

図 2.5: Space-Track.org のデブリ検索画面

(2) 低軌道デブリの観測可否判断

次にリストアップした低軌道デブリが観測可能なのかを判断するため、TLE データを可視化する必要がある。つまり、数字と記号のみの軌道情報を地図上に表示し、ひと目でデブリの軌道がわかるようにする必要がある。今回、この TLE データの可視化には Orbitron(図 2.6) という軌道計算ソフトを導入した。観測地点の緯度・経度・標高、そして観測したいデブリの TLE データを読み込ませることによって、リアルタイムでのデブリの位置情報を取得できる。観測の可否は以下の 4 点を踏まえて Orbitron の軌道情報を参照し、判断した。

- 観測地点 (名寄市) がデブリの観測可能範囲に入っているか
- デブリが地球の影に入っていないか
- 最大仰角が 5.4° 以上か
- 天頂付近を通過しないか

デブリや人工衛星はそれ自身が輝いているのではなく、太陽光を反射することで我々の目に届いている。したがって、太陽光の当たらない地球の影をデブリが通過している最中に観測することは不可能である。また、ピリカ望遠鏡の駆動範囲には限界があり、高度軸は 5° から 90° の範囲に限定される。デブリが天頂付近を通過しないことを条件に入れたのは、天頂付近を通過する物体の見かけの速度は大きいので、追尾精度が悪くなると考えたからである。

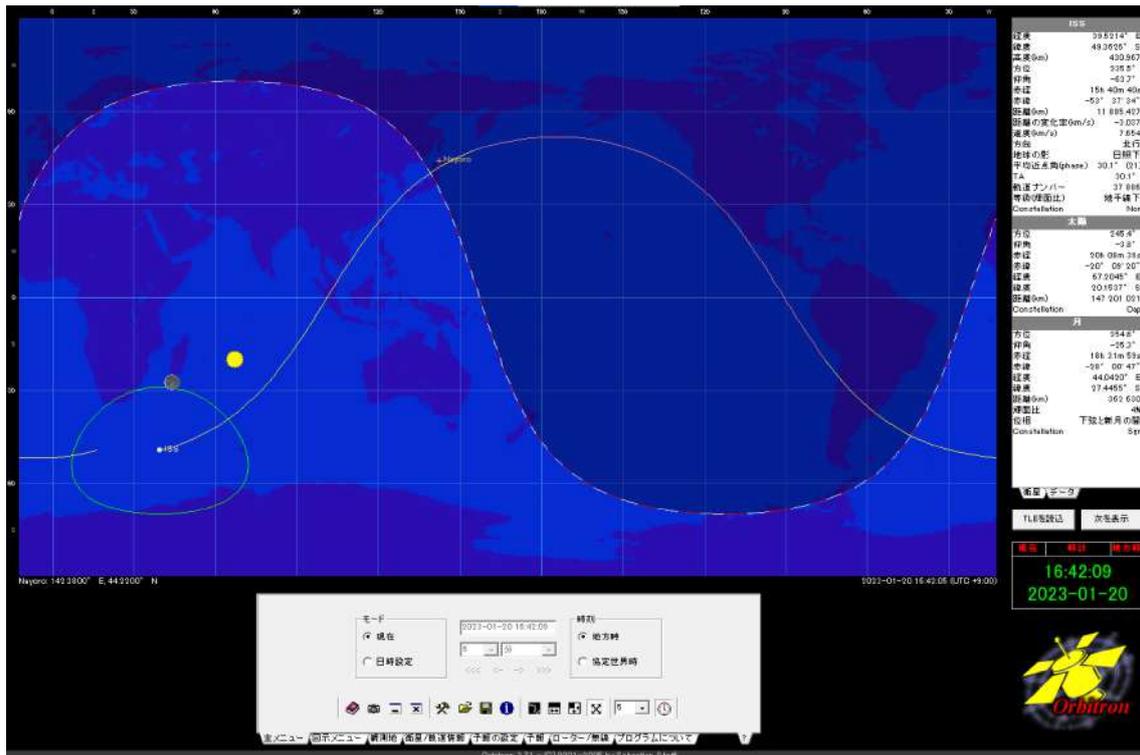


図 2.6: Orbitron による TLE データの可視化．緑線で囲まれた範囲で観測可能，黄色線は太陽光が当たっていることを示し，赤線は太陽光が当たっていないことを示す．

(3) ピリカ望遠鏡での観測

ピリカ望遠鏡は TLE データによる非恒星追尾が可能な sols コマンドが実装されている．SpaceTrack からカタログにあるすべての人工天体の TLE データを取得したあと，観測したいデブリのカタログ番号を指定して観測対象の TLE データファイルを作成する．その後作成したデータファイルに対して sols コマンドを実行すると追尾が開始する．撮像は 2.1.2 章で紹介した MSI を用いて，フィルターの有無，露光時間，撮影枚数を設定して実施した．

第3章

3 画像処理と解析

撮像完了後、観測データはFITS(Flexible Image Transport System)形式で保存され、解析の際には得られたFITSデータに対して、以降で述べる一次処理を施す必要がある。一次処理と解析には、天体解析ソフトウェアのIRAF, ds9(SAOImage), すばる画像処理ソフトMakali'iを使用した。

3.1 一次処理

観測によって得られた生画像データには、目標のデブリや人工衛星の信号に加えて、観測機器由来のノイズが含まれている。このようなノイズを除去することを一次処理といい、目標物体の画像の他に補正用画像を取得し、オブジェクトフレームから減算・除算処理することでこれらのノイズを取り除くことができる。

- バイアス・ダーク補正

CCDには、各ピクセルから読み出したアナログ信号をデジタル信号に変換する際に、出力値が負の値を取らないようにするため、ある一定値のバイアス電圧がかけられている。したがって目標の物体からの信号のみを取り出すためにはこのバイアスを減算しなければならない。バイアスフレームはCCDに光を入れない状態で設定可能な最小の露光時間で取得する。バイアスフレームは連続的に10枚取得され、ランダムに発生するばらつきを抑えるため、10枚のフレームを加算平均し1枚のバイアスフレームを作成した後に、各生データから差し引くことでバイアス補正を行った。

さらに、本研究の中には、最長で5分という、比較的長い露光時間で撮像を行ったフレームも存在する。この場合、CCD周辺の熱エネルギーによって励起された電子による暗電流ノイズ、いわゆるダークノイズを考慮する必要がある。ダークノイズは露光時間やCCD温度に依存するノイズのことで、温度が低いほど発生を抑制できる(図3.1)。ダークフレームはオブジェクトフレームと同一の露光時間で、バイアスフレーム同様、CCDに光を入れない状態で取得する。また、ダークフレームもばらつきを抑えるため、複数枚を加算平均し、1枚のダークフレームを作成した上でオブジェクトフレームから減算した。

なお、観測時の CCD 温度は -65°C であり、短時間の露光においてはダークノイズを無視できる。

- フラット補正

フラット補正は CCD の各ピクセルの感度ムラを取り除くために必要な処理である。フラットフレームは、望遠鏡をドーム内のフラット板に向け、フラットランプで均一な光を当てることによって作成した。フラットフレームはバイアス処理後、その画像自身の平均したカウント値で割り、規格化する。この操作を怠るとオブジェクトフレームのカウント値が大幅に減少することになる。最後に、バイアス・ダーク補正したオブジェクトフレームを規格化したフラットフレームで割ることにより一次処理が完了する。結果的に一次処理は以下のような作業を行ったことになる。

$$\text{オブジェクトフレーム} = \frac{\text{オブジェクトフレーム (raw)} - \text{ダーク・バイアスフレーム}}{\text{フラットフレーム} - \text{バイアスフレーム}}$$

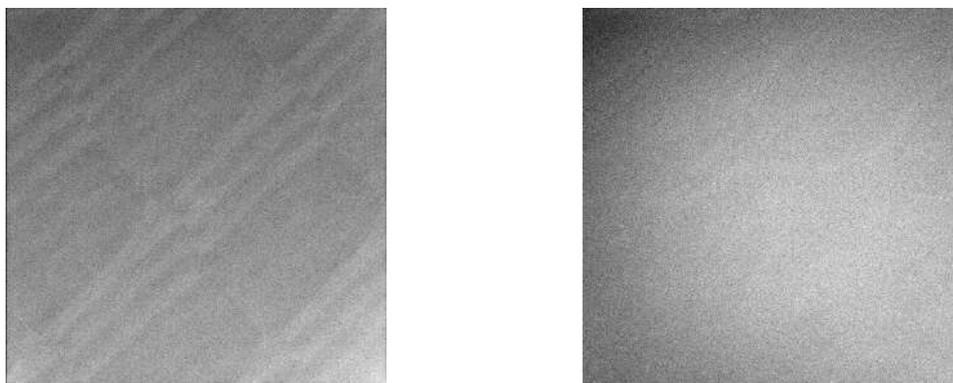


図 3.1: 左：生データ画像 (2022/11/26). 右：一次処理後の画像 (2022/11/26).

3.2 解析

(1) 点像の大きさ測定

画像内で点像が占める大きさをすばる画像処理ソフト Makali'i を用いて測定した。SL-8 DEB の画像 (図 3.2) を例に測定手法を説明する。SL-8 DEB (カタログナンバー: 21177) は 1991 年 2 月 12 日にロシアが打ち上げたロケットから派生したデブリであ

る。Space.Track によればこのデブリの RCS は $0.1 \sim 1.0\text{m}^2$ であるので、形状が正方形と仮定すれば一辺の大きさはおよそ $30\text{cm} \sim 1.0\text{m}$ である。したがって、画像内の点像の大きさと軌道高度から概算されるデブリの大きさと比較することによって、これらの点像が本当に観測対象のデブリであるのかを判断できる。図 3.2 の赤丸で囲まれた部分に対して Makal'i のグラフ機能 (図 3.3) を使用し、点像の半値全幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum) を測定した。以降、赤丸で囲まれた点像について、1 番の点像、2 番の点像 ... と呼ぶことにする。各点像に対して FWHM を測定した結果、表 3.1 のようになった。

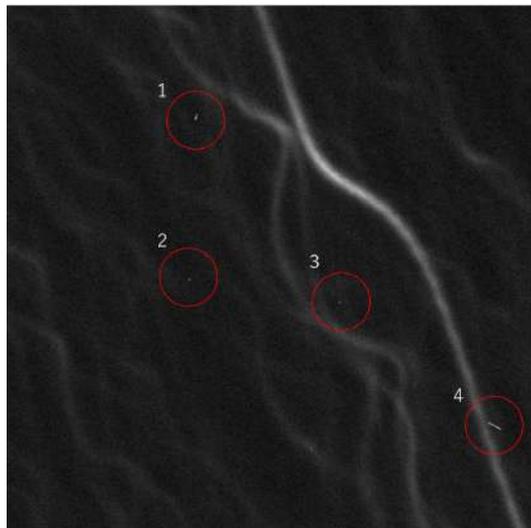


図 3.2: SL-8 DEB の撮像で確認された点像。4 番の赤丸で囲まれた領域は複数の点像が集まって光跡が形成されている。

表 3.1: 各点像の FWHM (4 番の光跡は点像の集まりであるため、個別に FWHM を求めて平均した)

点像	FWHM[pixel]
1	5.7
2	2.7
3	1.4
4	1.1

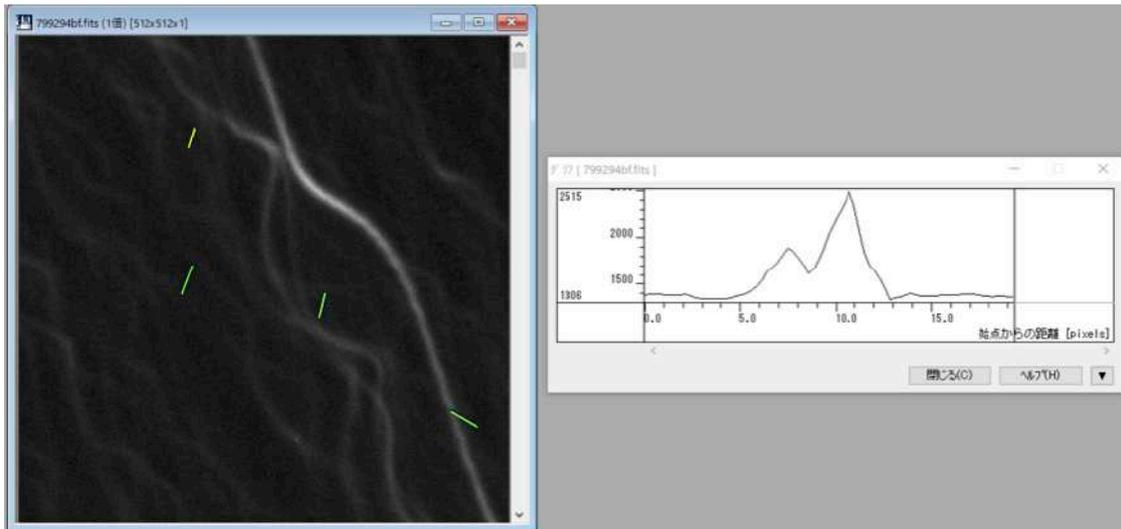


図 3.3: Makal'i を用いた点像の大きさ推定の様子。(右のグラフは左の画像中にある黄色の線分に沿ったカウント値の変化)

(2) 実際の軌道高度における点像の視直径

これらの点像が実際の軌道高度でどれ程の大きさであるのかを推定した。点像の視直径を θ 、SL-8 DEB の高度を R 、デブリの直径を D とすると、式 (3.1) を用いてデブリ大きさを推定できる。図 3.4 にデブリの視直径 θ 、高度 R 、実際のデブリの直径 D の関係を示した。

$$D = 2R \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.1)$$

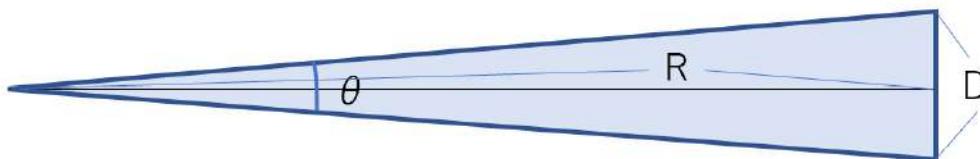


図 3.4: 三角関数を用いたデブリサイズの概算方法 (θ 、 R 、 D はそれぞれ視直径、デブリの高度、デブリの直径)

観測当時の SL-8 DEB の高度 R は 1511 km であり、これをもとに計算した。MSI の視野角は 1 ピクセルあたり $0.389''$ 、つまり $1.08 \times 10^{-4} [^\circ/\text{pixel}]$ に値する。さら視野角をラジアンに変換して $\theta = 1.88 \times 10^{-6} [\text{rad}/\text{pixel}]$ を得る。したがって式 (3.1) は次のように整理できる。

$$D = 2R \tan\left(\frac{1.88 \times 10^{-6} \times FWHM}{2}\right) \quad (3.2)$$

第4章

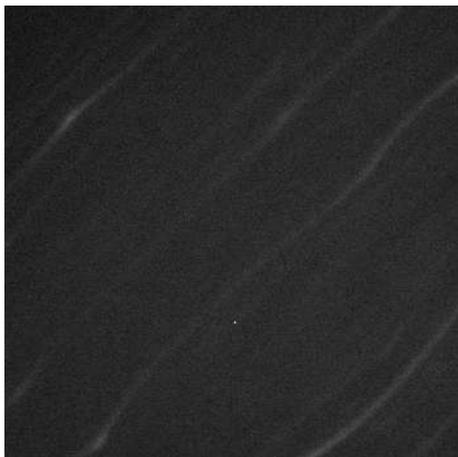
4 結果

4.1 観測結果

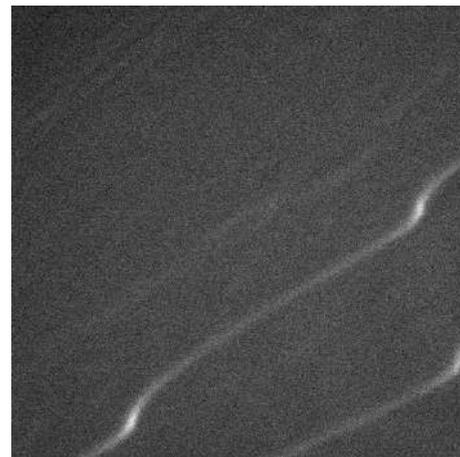
観測は10月26日,27日,11月24日,26日の計4夜実施した。章末の表4.1に今回観測した低軌道デブリと人工衛星のリストを掲載してある。表中の観測結果において,○,×はそれぞれ画像内に点像が確認できたものとできなかったものを示す。また,'shadow'の表記は観測対象が地球の影に入っていしまい,観測できなかったことを示している。

- SL-8 Rocet Body

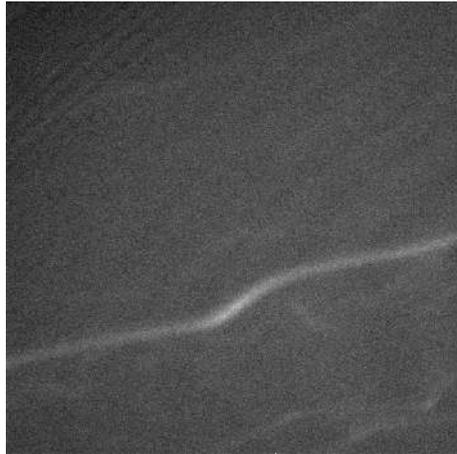
SL-8 Rocket Bodyは国際認識番号2018-097B,遠地点距離1507 km,近地点距離1482 km,軌道傾斜角 82° の二段目ロケットである。図4.1は2022年10月26日に観測したデータで,観測当時の天気は快晴,露光時間は20,30,40秒で,それぞれの露光時間で一枚ずつ,フィルターを入れずに撮像した。



(a) 01:41:56–01:42:27(JST), 露光時間 30s



(b) 01:43:30–01:43:51(JST), 露光時間 20s

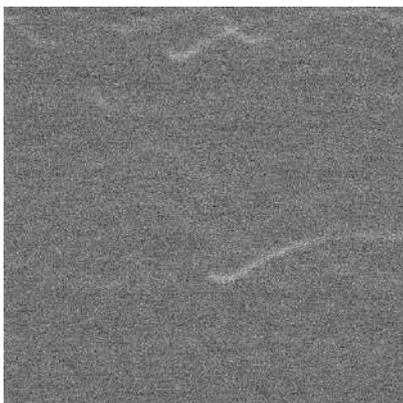


(c) 01:45:26–01:46:07(JST), 露光時間 40s

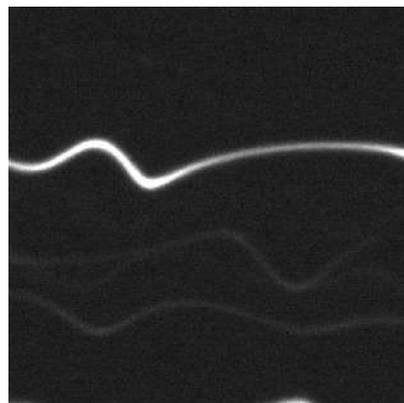
図 4.1: SL-8 Rocket Body を撮像した様子．フィルターなし．(2022/10/26)

- SL-8 DEB

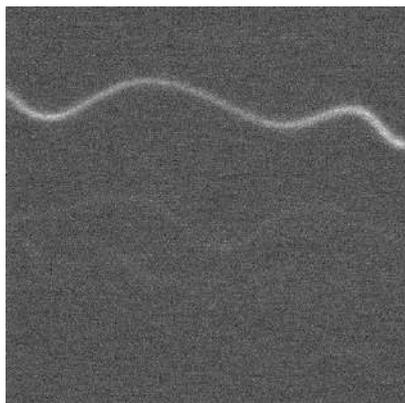
SL-8 DEB は国際認識番号 1991-009AQ, 遠地点距離 1737 km, 近地点距離 1505 km, 軌道傾斜角 74° の低軌道デブリである．図 4.2 は 2022 年 10 月 27 日に観測したデータで, 観測当時の天気は快晴, 露光時間は 5 秒で 5 枚, 120 秒で 1 枚, 300 秒で 1 枚の計 7 枚撮像した．フィルターは V バンドフィルターを使用した．



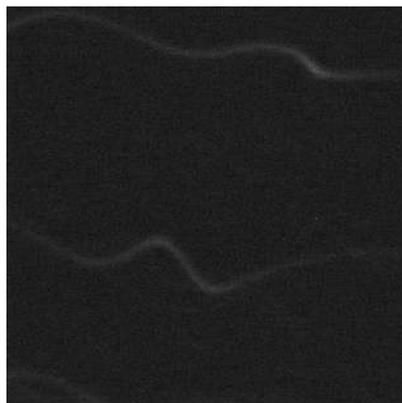
(a) 04:26:19–04:26:26(JST), 露光時間 5s



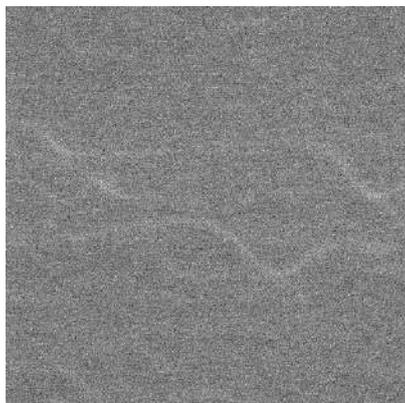
(b) 04:26:26–04:26:32(JST), 露光時間 5s



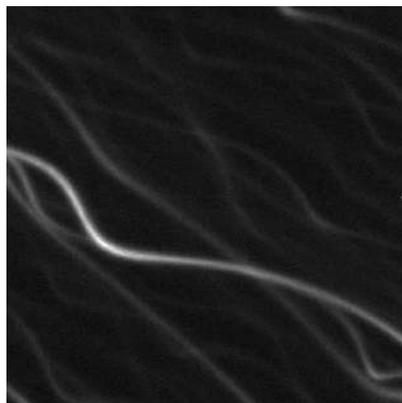
(c) 04:26:33–04:26:39(JST), 露光時間 5s



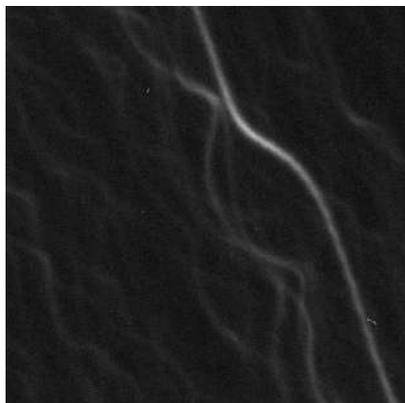
(d) 04:26:40–04:26:46(JST), 露光時間 5s



(e) 04:26:46–04:26:52(JST), 露光時間 5s



(f) 04:28:02–04:30:03(JST), 露光時間 120s

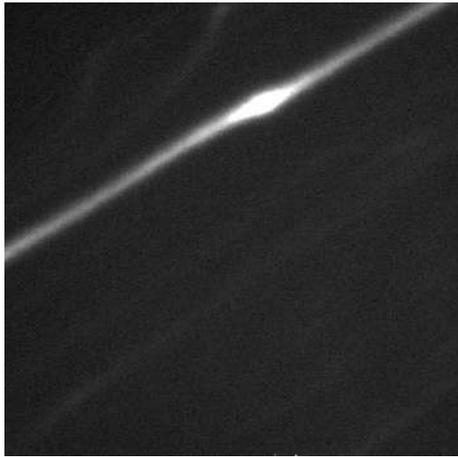


(g) 04:33:29–04:38:30(JST), 露光時間 300s

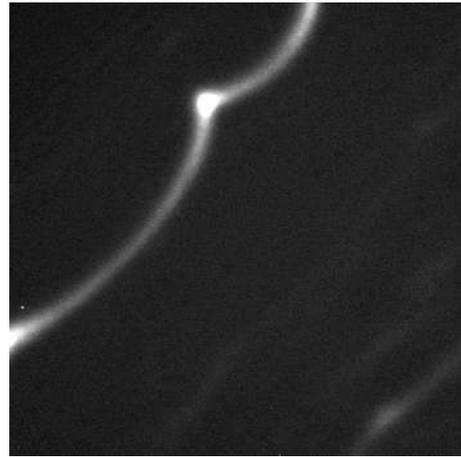
図 4.2: SL-8 DEB を撮像した様子 . V フィルターを使用 . (2022/10/27)

- COSMOS 2528 DEB

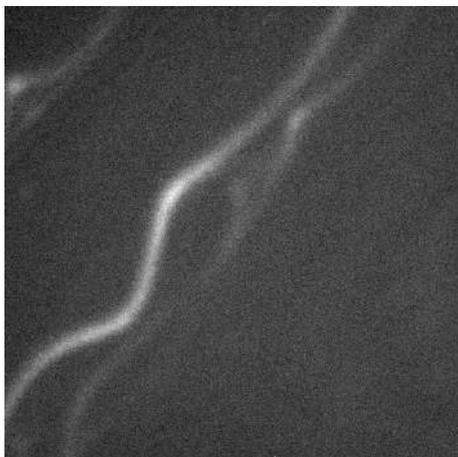
COSMOS 2528 DEB は国際認識番号 2018-082C，遠地点距離 921 km，近地点距離 899 km，軌道傾斜角 67° の低軌道デブリである．図 4.3 は 2022 年 11 月 26 日に観測したデータで，観測当時の天気は快晴，露光時間は 60 秒で 3 枚，10 秒で 1 枚の計 4 枚撮像した．フィルターは使用せずに観測を実施した．



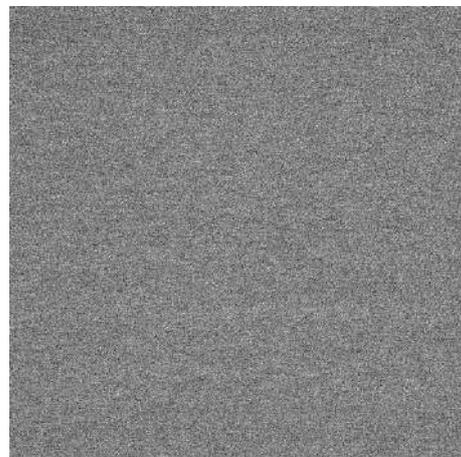
(a) 03:45:57–03:46:58(JST)，露光時間 60s



(b) 03:46:59–03:48:00(JST)，露光時間 60s



(c) 03:48:01–03:49:02(JST)，露光時間 60s

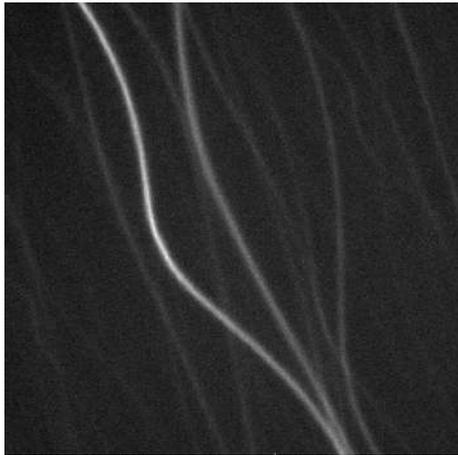


(d) 03:49:54–03:50:05(JST)，露光時間 10s

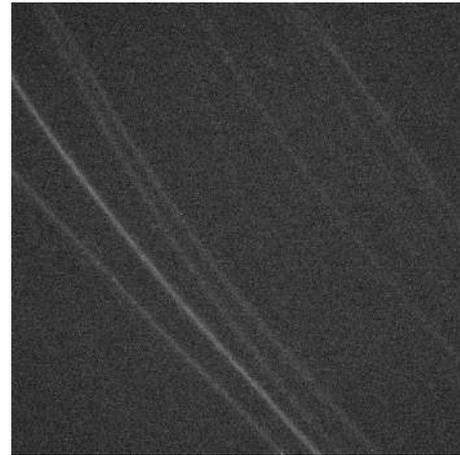
図 4.3: COSMOS 2528 DEB を撮像した様子，フィルターなし (2022/11/26)

- STARLINK-4337

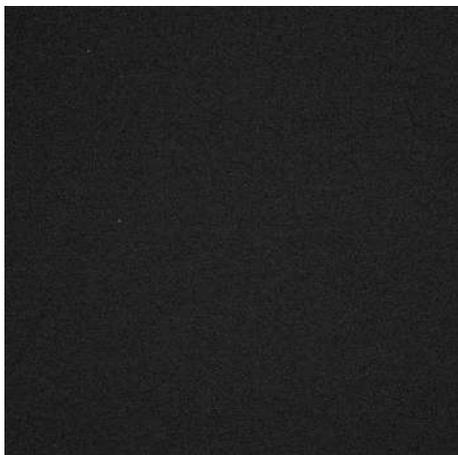
STARLINK-4337 は国際認識番号 2022-07-11 , 遠地点距離 562 km , 近地点距離 564 km , 軌道傾斜角 96° の低軌道衛星である . 図 4.4 は 2022 年 11 月 26 日に観測したデータで , 観測当時の天気は快晴 , 露光時間は 10, 30, 60 秒で 1 枚ずつ (Rc フィルター使用) , フィルター無しの 60 秒で 1 枚撮像した .



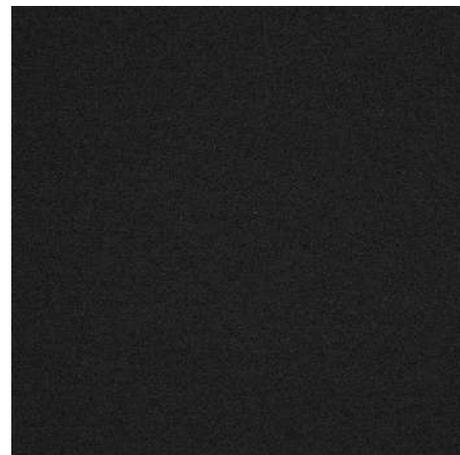
(a) 04:43:05-04:44:06(JST) , 露光時間 60s ,
フィルターなし



(b) 04:44:57-04:45:58(JST) , 露光時間 60s ,
Rc フィルター



(c) 04:46:24-04:47:25(JST) , 露光時間 30s ,
Rc フィルター



(d) 04:47:47-04:48:18(JST) , 露光時間 10s ,
Rc フィルター

図 4.4: STARLINK-4337 を撮像した様子 (2022/11/26)

これらは連続的に撮影されたのものであるので、追尾が成功していれば複数の画像で同一の位置に点像が映るはずである。しかし、今回観測した低軌道デブリや人工衛星のなかで、点像が確認できたものは以上の4つのデブリ及び人工衛星であり、連続して同じ位置に点像が確認できたものはなかった。

4.2 解析結果

3.2章で紹介したSL-8 DEBのフレームに確認された各点像(図3.2)のFWHMの値を式(3.2)に代入すると、視直径と実際の軌道高度1511 kmでのデブリの直径Dは表4.1のようになった。

表 4.1: 各点像の視直径および実際の高度での直径

点像	FWHM[pixel]	視直径 [$\times 10^{-4}$ °]	直径 [cm]
1	5.7	6.2	28
2	2.7	2.9	13
3	1.4	1.5	6.9
4	1.1	1.2	5.5

画像内に現れる1ピクセルの点像は高度1511 kmにおいて約5 cmであることが計算で明らかになった。したがって2, 3, 4番がSL-8 DEBである可能性は非常に低いと言える。一方で1番の点像は直径がおよそ28cmであり、誤差の範囲内と考えられる。しかし、連続して7枚を撮像した中で、点像が見受けられたのは一枚のみであった(図4.2)ことを考えると、1番の点像もSL-8 DEBではない可能性が高い。点像が確認できた他のデブリについても同様の計算を行い、実際の大きさを推定したが、SpaceTrackに掲載されているRCSのデータとは大幅に異なっていた(表4.2)。したがってこれらの点像や光跡はショットノイズ、あるいは宇宙線であると考えられる。また、撮像された画像の中には、度々曲線的な光跡が確認された。これらの曲線が撮像された原因について5章で考察する。

表 4.2: 他のデブリや人工衛星のサイズ推定

名称	高度 [km]	RCS[m ²]	FWHM[pixel]	視直径 [$\times 10^{-4}$ °]	直径 [cm]
SL-8 R/B	1459	LARGE	1.7	1.8	8.1
COSMOS 2528 DEB	928	LARGE	2.0	2.2	6.1
STARLINK-4437	567	LARGE	1.8	1.9	3.3

表 4.3: 観測した LEO デブリ及び低軌道人工衛星の一覧

観測日時	カタログ番号	名称	種類	打ち上げ日	フィルター	露光時間 [s]	仰角 [Sta-End;deg]	方位角 [Sta-End;deg]	エアマス [Sta-End]	高度 [km]	撮影枚数 [枚]	観測結果
2022/10/26	27535	SL-8 R/B	ROCKET BODY	2002/09/26	NONE	8,20	27.7-26.2	235.0-302.6	2.147-2.256	1004	8	×(shadow)
	27745	SL-8 DEB	DEB	1991/02/12	NONE	0.488,1.5,6	19.7-32.8	282.2-221.8	2.950-1.842	1606	20	×(shadow)
	1000	TITAN 3A DEB	DEB	1965/02/11	NONE	1.5,8,30	18.2-19.3	302.4-333.7	3.185-3.015	2790	16	×(shadow)
	43656	CZ-4B R/B	ROCKET BODY	2018/10/24	NONE	8,20	31.5-26.8	77.7-158.0	1.909-2.211	780	6	×(shadow)
	28910	SL-8 R/B	ROCKET BODY	2005/12/21	NONE	20,30	27.0-16.8	105.2-141.7	2.192-1.950	1459	3	○
	43281	CZ-4C DEB	DEB	2018/04/10	NONE	5,8,20	40.8-30.8	225.6-25.6	1.530-3.442	1115	13	×(shadow)
2022/10/27	20624	COSMOS 2082	PAYLOAD	1990/05/22	NONE	10,120	12.9-16.9	37.1-111.6	4.440-3.418	848	6	×(shadow)
	43281	CZ-4C DEB	DEB	2018/04/10	V	5,120	12.7-21.0	239.6-308.1	4.478-2.777	1184	7	×
	21177	SL-8 DEB	DEB	1991/02/12	V	5,120,300	29.3-14.1	219.9-353.7	2.040-4.071	1511	7	○
2022/11/24	35414	JASON DEB	DEBRIS	2001/12/07	NONE	5,15,30,50	17.6-10.9	31.90-130.8	3.282-5.188	1215	19	×
	36588	SERVIS 2	PAYLOAD	2010/06/02	NONE	60,75	18.2-11.8	134.9-165.4	3.174-4.808	1202	2	×
	54249	SL-24 R/B	ROCKETBODY	2009/07/29	NONE	150	21.4-19.9	166.2-137.0	2.733-2.930	1105	1	×
	40552	GONETS M11(M21)	PAYLOAD	2015/03/31	NONE	5,15,180,240	14.0-14.4	4.444-167.5	4.089-3.986	1491	12	×
	43752	COSMOS 2531	PAYLOAD	2018/11/30	NONE	240	20.1-48.6	197.4-216.5	2.895-1.332	1507	1	×
2022/11/26	54249	SL-24 R/B	ROCKETBODY	2009/07/29	NONE	5,10,20,30	27.2-20.1	165.5-108.1	2.184-2.892	1097	12	×
	45037	COSMOS 2528 DEB	DEB	2018/10/25	NONE	10,60	13.2-7.4	154.3-115.6	4.322-7.521	928	4	○
	40552	GONETS M11(M21)	PAYLOAD	2015/03/31	Re	60	43.2-27.2	182.4-177.3	1.459-2.181	1503	2	×
	36588	SERVIS 2	PAYLOAD	2010/06/02	Re,NONE	60	48.8-18.3	95.7-182.7	1.328-3.170	1197	4	×
	36038	SL-19 DEB	DEB	2009/11/02	Re	60,120	38.1-8.6	84.9-181.2	1.617-6.470	713	4	×
	40921	COSMOS 2508	PAYLOAD	2015/09/23	NONE	40,60,75,120	7.9-9.8	72.0-137.2	7.048-5.728	1490	6	×
	53053	STARLINK-4337	PAYLOAD	2022/07/11	Re,NONE	30,60	25.2-17.6	0.1-200.2	2.339-3.294	567	4	○
	53131	CZ-2C R/B	ROCKET BODY	2020/07/15	NONE	75	13.5-8.4	60.6-42.3	4.245-6.679	467	1	×
	52202	COSMOS2554	PAYLOAD	2022/04/07	Re,NONE	75,150	12.5-12.6	16.0-127.1	4.551-4.525	910	4	×
	54039	CZ-2C R/B	ROCKET BODY	2022/10/12	NONE	75	32.3-17.4	22.8-8.4	1.866-1.866	514	1	×
	53130	SUPERVIEW NEO-2 02	ROCKET BODY	2022/07/15	Re	30,75	37.2-27.3	112.5-29.6	1.652-2.176	496	2	×

第5章

5 考察

第4章で述べたように、観測で得られた画像には度々明るい曲線が確認された。曲線が撮像された原因としては(1)背景の恒星、(2)追尾中の観測対象、(3)対象とは別の低軌道デブリ・人工衛星、以上の3つが考えられる。

(1) 背景の恒星

はじめに、これらの曲線が背景にある恒星である可能性を考える。追尾の途中で視野に写り込んだ可能性もあるので恒星を正確に特定することは難しいが、光跡と恒星の光の広がり方を比較することで、ある程度の検証は可能であると考えた。光の広がり方はエアマスの値に大きく左右されるので、撮像した恒星のエアマスとほぼ同じ値を取る光跡で比較した(図5.1)。

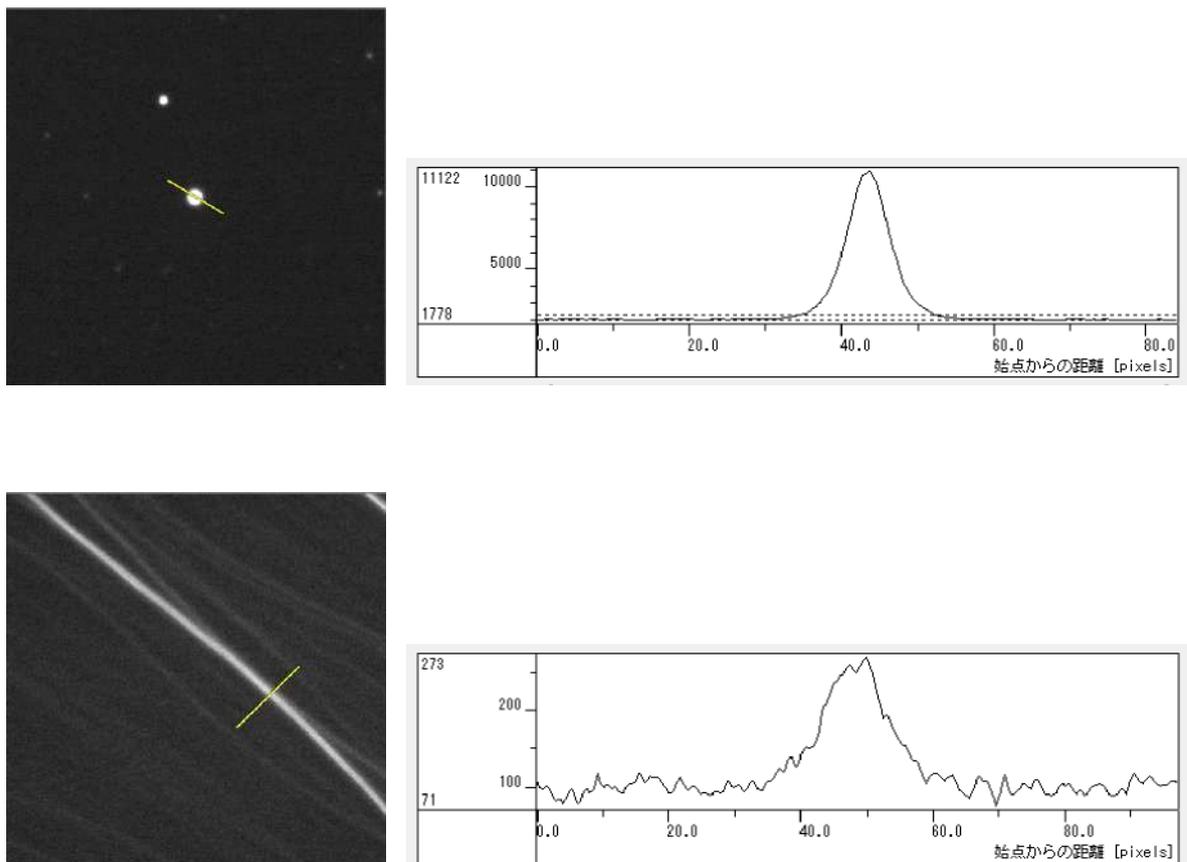


図 5.1: 恒星 BD+40 1627(上) と CZ-4C DEB のフレーム (下) の画像 .
グラフはフレーム内黄色の線分で切り取ったときのカウント値の変化 .

比較に使用した恒星 BD+40 1627 はピリカ望遠鏡の焦点合わせの際に撮像したもので、エアマスは 1.037、露光時間は 5 秒である。一方、光跡のフレームは CZ-4C DEB を撮像したときに取得したもので、エアマスは 1.020、露光時間は 8 秒である。恒星と光跡の光の広がり方を比較すると、カウント値に大きな差が見られるものの、グラフの形状自体は類似していることがわかる。しかし、デブリあるいは人工衛星の中には図 5.1 の光跡のような、光度変化が明確でないものも多く存在するため、光度が一定である光跡に対して恒星、デブリ・人工衛星の区別をすることはできないであろう。

(2) 追尾中の観測対象

COSMOS 2528 DEB のフレーム内に確認された明るい曲線を図 5.2 に示した。仮にこの光跡が追尾中のデブリ、人工衛星、あるいは背景の恒星であると考えたと、これほどの曲線を描くのは不自然であり、望遠鏡の追尾方法に問題があると考えられる。図 5.2 の下の画像を参照すると、曲線上の明るい点の前後で曲線の曲がり方に変化が見られる。したがって、デブリの追尾中、その明るい点の前後で、望遠鏡の方位軸、高度軸の駆動方法が変わり、視野内にあった恒星像が画素空間内にとどまったことによって、明るい点が撮像されたと考えられる。

また、図 5.2 では局所的に明るい箇所が見受けられた。これらの光度変化が望遠鏡の姿勢変化によるものでないとすると、これらの光跡は追尾中に明るさが変化している物体、すなわちデブリあるいは人工衛星の可能性も考えられる。デブリや人工衛星は太陽光を反射して輝いているため、それ自身の姿勢の変化によって反射光の強度も変化するためである。露光中に明るさが変化するのは雲の有無にも影響されるが、観測当時の天気は快晴であり、雲の影響はなかった。図 5.2 の右のグラフを見ると、上のグラフでは、始点からの距離 330 pixel に、下のグラフでは 0 pixel と 350 pixel 付近にピークがあり、明確な光度変化を示している。これらの曲線が実際に COSMOS 2528 DEB であるかは断定できないが、もしそうであった場合は露光時間を短くし、観測対象を点像で収めるというような改善の余地がある。ただし、露光時間の調整はデブリが見えている数分間に限られるため、事前に露光時間の設定パターンを考えておく必要がある。

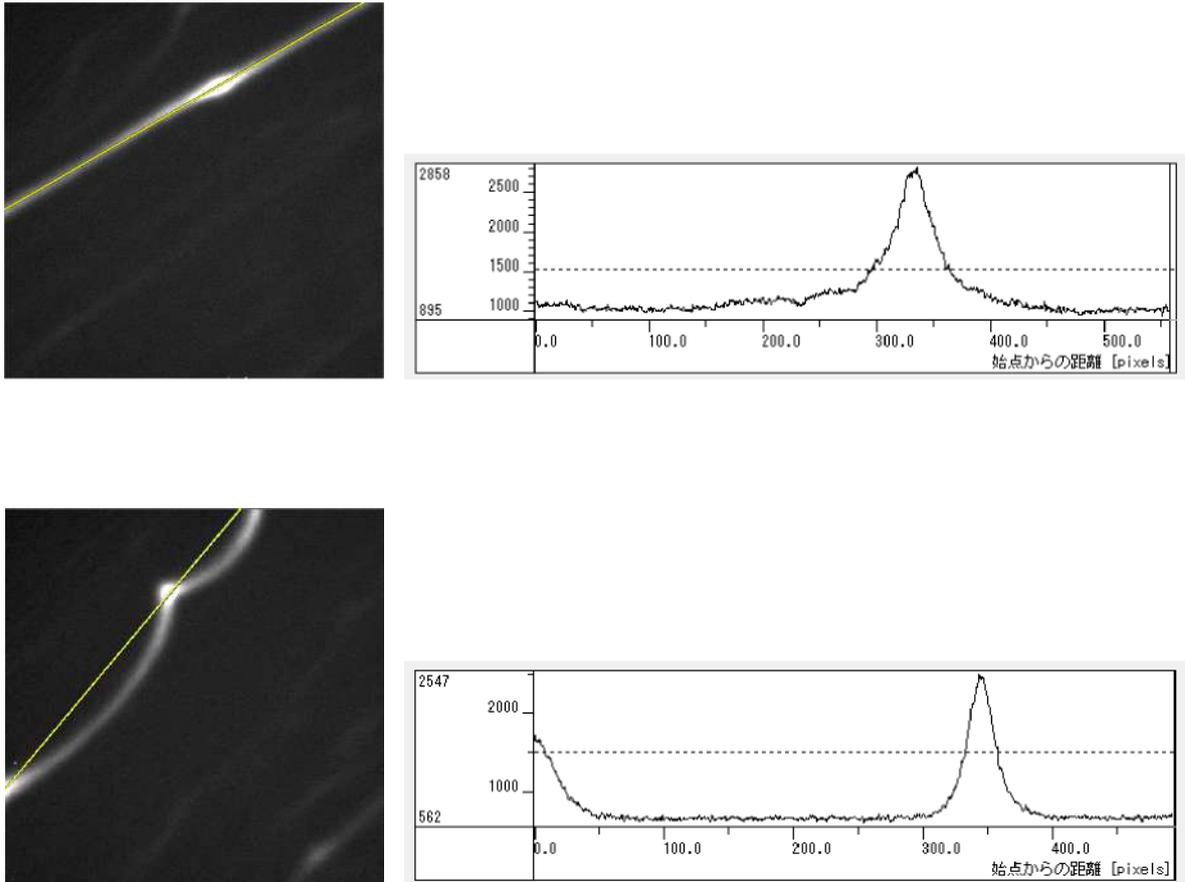


図 5.2: 露光時間 60s で撮像したときの COSMOS 2528 DEB のフレーム .
 グラフはフレーム内黄色の線分で切り取ったときのカウント値の変化 . 線分の
 始点は画像左下 .

(3) 対象とは全く別の低軌道デブリ・人工衛星

あるいは、観測対象が望遠鏡の視野の外にあり、別のデブリ・人工衛星がフレーム内に写り込んだ可能性がある。追尾が成功しているならば、デブリは点像として取得される。ピリカ望遠鏡の視野は $3.3' \times 3.3'$ であり、広い視野をもつわけではない。2章で紹介したとおり、TLE データは最大で $15'$ ほどの誤差を引き起こすため、観測対象が視野の外にある可能性もある。(2) のように部分的に明るい箇所が確認できる曲線については、観測対象とは全く別のデブリ・人工衛星である可能性を生じさせるが、観測対象と思わしき点像が確認できない限り、(2) との区別は非常に困難である。

第6章

6 まとめと今後の展望

スペースデブリは現在、その約80%が地球低軌道を周回しており、地球上への落下、人工衛星との衝突などが問題視されている。このような事故を防止するため、デブリの軌道予測や観測が必要不可欠である。また、デブリの表面物質、運動特性を明らかにすることは、デブリと人工衛星の衝突回避、デブリの回収、地球上への落下予測の際に有用である。本研究では、低軌道デブリの物理特性を解明するため、ピリカ望遠鏡を用いて低軌道デブリや人工衛星の撮像を実施した。

ピリカ望遠鏡で低軌道デブリを追尾し観測した実績は無く、非常に挑戦的な研究となった。観測して得られたデータに対して一次処理をした後、画像内に確認された点像と曲線的な光跡について解析を行った。観測した低軌道物体のうち、点像が確認されたのはSL-8 Rocket Body, SL-8 DEB, COSMOS 2528 DEB, STARLINK-4337の4つであった。これらの点像に対して画像処理ソフトMakalifiのグラフ機能を使用して、フレーム内で点像が占める大きさを計測した。点像の大きさをFWHMとし、点像が確認できたデブリや人工衛星の軌道高度を用いて計算することにより、実際の軌道高度でのデブリの大きさを推定した。その結果、実際の軌道高度での点像の大きさは、既存のデータを遥かに下回ることが明らかになった。また、連続して撮像されたフレームの前後で、同じような場所に、似たような点像は確認できなかった。したがってこれらの点像は観測対象ではなく、宇宙線あるいはショットノイズである可能性が高い。

一方で、撮像したフレーム内には複数の曲線的な光跡が確認できた。これらの曲線が撮像されたのは、観測対象の追尾中に、望遠鏡の姿勢が変化したことが原因であると考えられる。局所的に現れた明るい光は、望遠鏡の駆動が変化し、視野内にあった恒星が画素空間上にとどまることで撮像された可能性がある。しかし、これらがデブリ、あるいは人工衛星である可能性も残されている。デブリや人工衛星は太陽の光を反射して我々の目に届くが、デブリの姿勢によって反射する光の強さは異なる。そのため、短時間で周期的な光度変化が見られる(図5.2)ことは、その光跡がデブリや人工衛星である根拠になりうる。

さらに、取得した画像内には光度がほぼ一定であるような光跡も見受けられた。これは、望遠鏡の視野に恒星が背景に入り込んだ可能性が非常に高い。恒星の光の広がり方と光跡の光の広がり方を比較すると、似たような挙動を示すことがわかっ

た．しかしこの考察は恒星自身の大きさや明るさに依存するため，やや不十分である．それに加え，このような光度に変化が見られない光跡はデブリ・人工衛星である可能性もある．姿勢が安定していて，常に観測者に対して同じ面を向けていれば，デブリや人工衛星の反射光は一定となるからだ．結果的に曲線が現れた原因を特定することは困難であるという結論に至ってしまうが，FITS ファイルには露光始めと終わりの赤経赤緯のデータが含まれているため，観測対象の追尾が終了した後に望遠鏡をその位置に戻して撮像することにより，写り込んだ曲線の正体が明らかになると考えられる．

今回の観測で，そもそも低軌道デブリを追尾できていないという問題が生じたため，デブリの他に比較的大きくて明るい低軌道衛星にも目を向けて観測を実施したが，デブリ同様，追尾ができていない様子だった．ISS を観測した際には，観測者から見て ISS が天球上を移動する速度に天文台のドームの回転が追いつかず，回転モーターのエラーが発生した．

今回の観測では低軌道物体の追尾ができず，十分な成果を得ることができなかった．現状，デブリの数は低軌道がほとんどを占めるため，低軌道分野における研究は重要であるが，ピリカ望遠鏡での低軌道物体の追尾は限度があることを本研究で認識した．今後は別手段での低軌道デブリの観測，あるいはピリカ望遠鏡を使用した静止軌道デブリの物性解明を予定している．静止軌道デブリの物性解明は Vananti et al.[2017] にあるような研究を行う予定だが，MSI の特性を活かし，より細かい波長ごとにスペクトルを抽出して精度の高い物質特定を目指していく．

7 謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々にお世話になりました．

指導教員である佐藤光輝教授には，論文の書き方や資料の作成方法といった基礎的な事柄，研究に対する心構えやサイエンスを追求することの重要性を教えて頂きました．また，低軌道デブリの観測に関して，思わしい結果が出ない際には，多くのご助言を頂きました．ここに深謝の意を表します．

高木聖子講師にはピリカ望遠鏡の操作をはじめ，望遠鏡関連の相談，さらに夜遅くに発生したエラー対応など大変お世話になりました．厚く御礼申し上げます．

名寄市立天文台の内藤博之氏をはじめ，同天文台の職員の方々には観測に対して多くのご支援を頂きました．また，ドームのエラー発生時には現地で多くの方々に復旧作業をしていただきましたこと，この場を借りて深く感謝いたします．

EOUの皆様にはセミナーを通じて多くのアドバイスを頂きました．先輩である大野辰遼さん，濱田築さん，同期の天田耕太郎くんには夜遅くまで観測に付き添って頂きました．また，毎週のミーティングでは画像処理やプログラミングに関して様々なことをご教授頂きました．本当にありがとうございました．

8 参考文献

- Aida, S., M. Kirschner(2013), ACCURACY ASSESSMENT OF SGP4 ORBIT INFORMATION CONVERSION INTO OSCULATING ELEMENTS, *Proceedings of the 6th European Conference on Space Debris ' Darmstadt, Germany, 22–25 April, 2013*
- google earth, <https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>
- Magnusson, P(1986), Distribution of Spin Axes and Senses of Rotation for 20 Large Asteroids, *ICARUS*, **68**, 1–39.
- *NASA Orbital Debris Quarterly News*(2022), **26** (1),(2)
- Seitzer, P., S. M. Lederer, H. Cowardin, T. Cardona, E. S. Barker, and K. J. Abercromby(2012), Visible Light Spectroscopy of GEO debris, *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, held in Wailea, Maui, Hawaii, 11–14 September, 2012.*
- SPACE-TRACK.ORG, <https://www.space-track.org>
- Vananti, A., T. Schildknecht, and H. Krag(2017), Reflectance spectroscopy characterization of space debris, *Adv. Space Res.*, **59**, 2488–2500, doi:10.1016/j.asr.2017.02.033.
- Watanabe, M., Y. Takahashi, M. Sato, S. Watanabe, T. Fukuhara, K. Hamamoto, A. Ozaki(2012), MSI: a visible multi-spectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University, *Proceedings of the SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV.*, **8446**, 84462O, doi: 10.1117/12.925292.
- Yanagisawa, T., and H. Kurosaki(2012), Shape and motion estimate of LEO debris using light curves, *Adv. Space Res.*, **50**, 136–145, doi: 10.1016/j.asr.2012.03.021.
- Zappalà(1980), A SEMI-ANALYTIC METHOD FOR POLE DETERMINATION OF ASTEROIDS, *The Moon and the planets*, **24**, 319–325.
- 北海道大学大学院理学研究院附属天文台, <https://sana.ep.sci.hokudai.ac.jp/nayoro/>