ピリカ望遠鏡を用いた 宇宙飛翔体の反射率スペクトルと 表面物質の推定

小谷野 蓮

学生番号:02170802

北海道大学 理学部 地球惑星科学科

宇宙惑星グループ

指導教員:佐藤 光輝

令和3年2月1日

要旨

近年、宇宙利用の拡大が進むにつれ、スペースデブリ(宇宙ゴミ)の増加が問題になっ てきている。スペースデブリが運用中の宇宙機にぶつかれば、放送・通信など様々な地球 上の経済活動や研究活動に影響を及ぼすことが懸念されている。そこで地球上の環境問題 と同じように、宇宙の環境問題として、スペースデブリ対策に取り組んでいく必要があ る。スペースデブリがどのくらいの大きさをしているのかはスペースデブリを除去する上 で非常に重要な要素の一つであるが、いまだその大きさを地上観測から正確に推定する方 法は確立されていない。そこで本研究では、ピリカ望遠鏡を用いた地上観測からスペース デブリの大きさを推定し、将来のスペースデブリ除去に有用な知見を提供することが最終 目的である。ただし、スペースデブリの大きさを推定するにはいくつかの段階を踏む必要 があるため、本論文ではその最初の段階であるスペースデブリの観測と表面物質の推定ま でを行う。

スペースデブリの表面物質を推定するための手段として、本研究では北海道大学の所有 する 1.6 m ピリカ望遠鏡を用いた反射率スペクトルの観測を実施した。ピリカ望遠鏡を用 いて静止軌道上にあるスペースデブリの追尾観測を行い、得られた反射率スペクトルを実 際に人工衛星に使われているパーツのスペクトルと比較することで、スペースデブリの表 面物質を推定した。本研究では、2021 年 10 月から 2022 年 1 月にかけて観測を実施し人工 衛星 1 機 (HIMAWARI-9)、使い捨てロケット残骸 1 機 (BREEZE-M)、衛星 (EKRAN2) 破片のデブリ 1 個の反射率スペクトルを推定することに成功した。それぞれの表面物質を 先行研究のデータと比較した結果、大まかな反射率スペクトルの形状が一致するものもあ ったが全体的にデータ数が少なく観測誤差が大きくなってしまったため、確実に表面物質 を推定できたものはなかった。しかし、反射率スペクトルから表面物質を推定することは 十分可能であり、今後も観測を続けて行くことでより良い結果が得られるのではないかと 考えられる。さらに、現有する衛星搭載機器のサンプルを複数用いてそれぞれの反射率ス ペクトルを計測し、望遠鏡で実測した反射率スペクトルと比較することによって、より精 度の高い物質の同定が可能となると考えられる。

目次

1	はじぬ	りに
	1.1	背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
	1.2	先行研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
	1.3	目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
2	観測	
	2.1	観測装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
	2.2	観測対象・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
	2.3	観測手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
	2.4	観測記録・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11
3	解析	
	3.1	一次処理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.2	開口測光・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
	3.3	大気減光補正・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.4	反射率スペクトル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
4	結果	
	4.1	ひまわり9号 (人工衛星)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16
	4.2	BREEZE-M (使い捨てロケット)・・・・・・・・・・・・・・・・・・17
	4.3	EKRAN2 (スペースデブリ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
5	考察	
	5.1	ひまわり9号 (人工衛星)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19
	5.2	BREEZE-M (使い捨てロケット)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	5.3	EKRAN2 $(\neg \neg \neg \neg \neg \neg \neg)$ · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	5.4	ピリカ望遠鏡を用いた観測について・・・・・・・・・・・・・・・・ 22
	_	
6	まとぬ	めと今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

謝辞

参考文献

1. はじめに

1.1 背景

スペースデブリ(以下デブリ)とはいわゆる宇宙ゴミであり、軌道上にある不要になっ た人工物のことを指す。具体的には、使用済みあるいは故障した人工衛星、打ち上げロケ ットの上段、宇宙探査ミッション遂行中に放出した部品、爆発・衝突し発生した破片等な どの例が挙げられる。デブリの数は年々増加しており、運用中の宇宙機との衝突の危険性 が高まっている。運用中の宇宙機と衝突すれば、放送・通信など様々な地球上の経済活動 や惑星探査機を用いた研究活動に壊滅的な被害を与えかねない。そこで地球上の環境問題 と同じように、宇宙の環境問題として、デブリ問題に取り組んでゆく必要がある。

図 1.1 は 1956 年から 2021 年の軌道上にある人工物の数を種別に示したものである[NASA Orbital Debris Quarterly News, 2021]。1957 年旧ソ連がスプートニク1 号を打ち上げて以来 デブリの総数は右肩上がりに増加しており、カタログ化されたものの総数は約 22,000 個に も上っている。2007 年には中国の衛星爆破実験、2009 年には通信衛星の衝突により、デ ブリの数が飛躍的に増加している。このように一度デブリが大量に発生してしまうと、そ のデブリがまた別の宇宙機と衝突して新たなデブリ生み出し、その数は加速度的に増加し てしまう。また 2016 年からは増加傾向が強まっているが、これは近年の流行である超小 型衛星の打ち上げ数増加のためであると考えられる。物体の衝突を防ぐため、またこれ以 上宇宙にごみを増やさないためにもデブリ環境についての理解を深め、除去する技術を確 立することが求められてきている。



図 1.1: 2021 年 2 月時点での地球周回軌道上の物体の総数 [NASA Orbital Debris Quarterly News, 2021]

1.2 先行研究

スペースデブリ環境を知るためにこれまで数々の研究が行われてきた。それらの研究で は主に光学望遠鏡を用いた地上からの観測という手法が取られてきた。過去の観測結果か らはカタログには載っていない新しいデブリの発見、軌道の推定・制御などが行われた [Schildknecht et al., 2008]。また明るさの時間変化からは形、回転、姿勢運動などを推定す る研究が行われた[Santoni et al., 2013; Yanagisawa and Kurosaki, 2012]。

しかし、いまだ地上からの観測でデブリの大きさを正確に推定する手法は確立されてい ない。等級から大きさの推定をすることは可能だが、そのためには表面物質の物性(アル ベド、色、反射の特性)などの情報が必要となってくる。

そこで、表面物質の物性を知るための有効な手段のひとつとして、反射率スペクトルの 観測を用いた研究が行われるようになった。反射率スペクトルとは反射率の波長依存性の ことである。反射率スペクトルは物質によって異なるため、観測されたデブリの反射率ス ペクトルと、実際に人工衛星に使われる部品の反射率スペクトルとを比較することで、あ る程度まで物質を絞り込むことができる。表面物質の構成が分かればより正確なアルベド の推定が可能となり、デブリの大きさを間接的に推定することが出来るようになる [Jorgensen et al., 2004; Bedard and Wade, 2017; Seitzer et al., 2016].

Schildknecht et al. [2017]は ESA の口径 1 m スペースデブリ望遠鏡を用いてデブリおよび 人工衛星の反射率スペクトル観測を行った。そして人工衛星の表面物質としてよく使用さ れる多層断熱材(MLI: Multi-Layer Insulation)、太陽電池などの反射率スペクトルと比較 し、表面物質を推定することに成功した。



しかし表面物質の推定に成功したデブリは、数多く観測されたデブリのうちごくわずか であり、まだまだ高い精度であるとは言えない。また、一部の観測されたデブリの反射率 スペクトルは 600 nm から 900 nm にかけて増加傾向がみられ、表面物質本来の反射率ス ペクトルから変化してしまっているという現象も確認された。赤化(レッドニング)と呼 ばれるこの現象は宇宙風化や経年劣化の影響であると考えられているが、その原因は未だ 明らかになっていない[*Abercromby et al.*, 2007]。



図 1.3: レッドニングが確認されたスペースデブリの反射率スペクトル [Schildknecht et al., 2017]

1.3 目的

本研究の目的はスペースデブリおよび人工衛星の反射率スペクトルを観測し、表面物質 を正確に推定することである。また最終的には本研究から得られた結果を用いてアルベド の推定をおこない、大きさを正確に推定する。そして将来のスペースデブリ除去に有用な 知見を提供し、宇宙環境の改善に役立てることである。

本研究では、先行研究で使用された望遠鏡よりも口径の大きい、有効口径 1.6 m のピリ カ望遠鏡を用いることで、過去の研究では観測できなかった、より小さなデブリの観測が 可能となると期待される。また、比較対象を増やすことで表面物質推定の精度を上げるこ とができると考えられる。

2. 観測

2.1 観測装置

• ピリカ望遠鏡

ピリカ望遠鏡は、北海道大学が北海道名寄市の北海道大学大学院理学研究院附属天文台 (東経 142.5°,北緯 44.4°標高 151 m)に設置した光学望遠鏡である。図 2.1 は付属天文 台とピリカ望遠鏡の外観である。主鏡は有効口径 1.6 m の単一鏡からなり、惑星観測に特 化した望遠鏡としては世界最大級になる[Watanabe et al., 2012]。表 2.1 にピリカ望遠鏡の主 な仕様について示す。



図 2.1: (左) 天文台の外観 (右) ピリカ望遠鏡の外観 [Watanabe et al., 2012]

光学系	リッチークレチアン
焦点	カセグレン
主鏡有効径	1600 mm
合成焦点距離	19238 mm
合成 F 値	f/12.0
視野	直径 20 分角

表 2.1:	ピリカ望遠鏡の主な仕様	[Watanabe et al., 2012]
P Q - · - · - ·		[,,,,,,,

• MSI (Multi-Spectral-Imager)

可視光マルチスペクトル撮像観測装置 MSI は、北海道大学の惑星宇宙グループがピリカ 望遠鏡用に開発した可視光の分光撮像観測装置である。図 2.2 に MSI の外観を示す。MSI は、2 種類の液晶波長可変フィルター(LCTF)と 512 x 512 ピクセルの電子増倍型 CCD (EMCCD)カメラを備え、LCTF と EMCCD カメラとを組み合わせることで、波長 400 nm から 1100 nm に渡るマルチスペクトル画像を素早く取得することができる。MSI の LCTF は、液晶を電気的に制御することで、透過波長バンドを機械的な可動部なしで素早 く変えることができる。フィルターホイールも備えており、UBVRI バンド広帯域フィルタ ーを用いた観測も可能となっている[*Watanabe et al.*, 2012]。表 2.2 に MSI の主な仕様につい て、図 2.3-2.5 に LCTF と広帯域フィルターの透過率曲線を示す。



図 2.2: MSI の外観 [Watanabe et al., 2012]

波長域	360 - 1050 nm
視野	3.3' × 3.3' (0.389"/pixel)
液晶波長可変フィルター	VIS: 400 - 720 nm, $\Delta\lambda \sim 10$ nm (@650 nm)
(LCTF)	SNIR: 650 - 1100 nm, $\Delta \lambda \sim 10$ nm (@900 nm)
広帯域フィルター	Johnson-Cousins U, B, V, R _C , I _C

表 2.2: MSI の主な仕様	[Watanabe et al.	, 2012]
------------------	------------------	---------



図 2.4: SNIR の透過率曲線 [Watanabe et al., 2012]



図 2.5: ブロードバンドの透過率 [Watanabe et al., 2012]

2.2 観測対象

静止軌道上の物体

静止軌道(Geostationary orbit, GEO)にある衛星およびスペースデブリを観測対象として 観測を行った。静止軌道上の物体は、赤道上空約36,000kmにあり、地球の自転と同じ公転 周期を持つ。静止軌道上のデブリを観測する利点は、この軌道を回る物体は地上からは天空 の一点に止まっているように見えることである。そのため、長時間の観測を行った際に観測 対象のエアマスのずれが小さい。また観測時期や観測時間に左右されず、日没後であればい つでも観測が可能なことも利点の一つである。対して低軌道にあるデブリは、公転周期が速 く、すぐに観測可能域から外れてしまうので観測の対象外とした。観測するデブリは Space-Track.orgのカタログ内から附属天文台から観測可能な位置にあるものを選んだ。表 2.3 に今 回観測したデブリおよび人工衛星の一覧を示す。

Object Name	Туре		
COSMOS 1317 DEB	Debris		
COSMOS 1897 DEB	Debris		
ISO DEB	Debris		
LUCH DEB	Debris		
FENGYUN 2A DEB	Debris		
FENGYUN 2F DEB	Debris		
FENGYUN 2G DEB	Debris		
EKRAN2 DEB	Debris		
BREEZE-M R/B	Rocket Body		
SL-12 R/B	Rocket Body		
SAKURA 2A	Payload		
HIMAWARI 9	Payload		

表 2.3 観測したデブリおよび人工衛星の一覧

• 太陽類似恒星(ソーラーアナログ)

ターゲットのデブリの近くにある太陽類似恒星を観測し、標準星として使用した。太陽 類似恒星とは、測光的に太陽に類似した星と定義されており、一般的には早期 G 型主系列 星のことを指す [Cayrel de Strobel, 1996]。太陽類似恒星を標準星として使用し、観測した スペクトルを太陽光スペクトルの代替とすることで、大気減光補正と同時に太陽光スペク トルの影響を除去することが出来る。観測する太陽類似恒星は UBVRI standards around Celestial Equator [Landolt, 1983]と UBV Photoelectric Sequences in SA 92-115 [Landolt, 1973]の 中から観測時にデブリに近いものを選んだ。今回は SA G97-42 と SA 98-978 を使用した。

2.3 観測手順

スペースデブリの観測には2行軌道要素形式(Two-Line elements, TLE)データファイルを用 いた非恒星追尾を行った。TLE データとは人工衛星やスペースデブリなど,地球を周回す る物体がどの位置にあるのかを計算するための軌道要素である。TLE データは随時更新さ れてゆくので最新のデータを使う必要がある。そのため、観測を行う日の初めに Space-Track.org から観測対象の最新の TLE データを取得し使用した。

観測はLCTF で 400~900nm を $\Delta\lambda$ =100nm でそれぞれ1枚ずつ撮影したものを1組とした。 暗すぎて十分なカウント値が稼げないものに関しては B、V、R、I バンドでの観測に切り替 えた。スペースデブリの明るさは先行研究などの結果から 10 等よりも暗いと予想されるた め、1 枚の画像を取得するのに 10 分以上の長時間露光を行った。デブリまたは衛星の観測 を1 組行い、その後太陽類似恒星の観測を1 組、全体を通して約1時間半の観測を繰り返 し行った。具体的な観測は以下の手順で行った。

- ① Space-Track.org から最新の TLE データを取得
- ② 望遠鏡の焦点合わせ
- ③ 望遠鏡を観測対象に向け追尾する
- ④ 観測対象を視野内に入れる(観測対象の初期位置が視野外にある時があるためオフセットを入れながら周囲を探す)
- ⑤ ブロードバンドで1枚撮像し、観測強度が十分であるか確認する
- ⑥ 観測強度が十分であれば LCTF で1セット、十分でなければブロードバンドで露光時間を伸ばして1セット撮像する
- ⑦ 観測対象の上を星が通過していないか確認→星が通過していた場合は撮影し直す
- ⑧ 観測対象と同じフィルターで太陽類似恒星を1セット撮像する
- ⑨ バイアスフレームの取得
- ⑩ フラットフィールドの撮像



図 2.6: ひまわり9号をVバンドで撮影したもの。画像中央の丸いものが観測対象、 横に走っている線が通過した星である。

2.4 観測記録

2021 年 10 月から 2022 年 1 月にかけて、日没後天候が良い日はすべて観測を行った。 以下の表 2.4 に観測記録の詳細を示す。十分な観測強度が得られたものに関しては観測結 果の欄に「〇」と記している。十分な観測強度が得られなかったもの、存在が確認できなか ったものに関しては「×」と記している。

観測日時	観測対象	フィルター	露光時間[s]	観測結果
2021/10/06	COSMOS 1897 DEB	V, 750	120, 300, 600	×
	ISO DEB	V	300, 600	×
2021/10/08	COSMOS 1897 DEB	V	300, 600	×
	LUCH DEB	V	300, 600	×
2021/10/09	COSMOS 1897 DEB	V	600	×
	FENGYUN2G DEB	V	600	×
2021/10/12	FENGYUN2F DEB	V	600	×
	FENGYUN2A DEB	V	600	×
	COSMOS 1897 DEB	V	600	×
2021/10/25	SL-12 R/B	V	600	×
2021/10/26	COSMOS 1317 DEB	V	600	×
2021/11/06	SAKURA 2A	V, 750, 850	600, 1200, 1800	×
	COSMOS 1317 DEB	V, R	600	×
2021/11/17	SAKURA 2A	V, 400, 500	600	×
2021/12/07	HIMAWARI 9	B, V, R, I	900, 600, 480, 420	\bigcirc
		400~900	600	\bigcirc
2021/12/08	BREEZE-M R/B	B, V, R, I	600, 600, 180, 120	\bigcirc
		400~900	1200	\bigcirc
	SA G97-42	B, V, R, I	300, 75, 50, 12	\bigcirc
		400~900	600	\bigcirc
2021/12/09	EKRAN2 DEB	B, V, R, I	600, 600, 240, 180	\bigcirc
		400~900	1200	\bigcirc
	SA 98-978	B, V, R, I	600, 180, 75, 75	\bigcirc
		400~900	900	\bigcirc
2022/01/09	HIMAWARI9	B, V, R, I	600, 300, 180, 120	\bigcirc
	BREEZE-M R/B	B, V, R, I	600, 600, 180, 120	\bigcirc
	EKRAN2 DEB	B, V, R, I	600, 600, 240, 240	\bigcirc
	SA 98-978	B, V, R, I	600, 180, 75, 75	\bigcirc

表 2.4 観測記録

3. 解析

3.1 一次処理

観測で得られた生データの一次処理には iraf を使用した。一次処理とは、バイアス・フラ ットを処理し標準的な解析が可能な画像を作ることである。観測で得られたすべての画像 に対して以下の処理を行い解析可能な一次処理済みの画像を得た。

RawFrame(i, j) - BiasFrame(i, j)CorrectedFrame(i, j) = flatfield(i, j) - BiasFrame(i, j)(*i*, *j*): CCD のピクセル座標(水平, 鉛直)

• バイアス

バイアスとは CCD の出力値が負の値を示さないようにあらかじめ CCD に乗せられてい る値のことである。よって、観測対象からの信号のみを取り出すためにはバイアスを生デー タから引く必要がある。バイアスフレームの撮像は観測装置のフィルターを閉じ CCD に光 が全く入らない状態で、最小露光時間で撮像する。気温などで少しずつ時間変化するので、 天体のデータ取得の前後に挟みながら、時々取得するようにした。

フラット

フラットとは望遠鏡装置に一様な光を当てたときに、起こる非一様な感度ムラのことで あり、CCD の感度ムラや、フィルターの汚れなどに起因する。フラットの補正には、一様 な明るさのものを撮像したフラットフィールドで割り算する必要がある。フラットフィー ルドの取得には天文台のドーム内にあるフラット板にフラットランプを当てることで一様 な光源を得た。





図 3.1: (左) 生画像 (右) 一次処理後の画像

3.2 開口測光

開口測光とは天体の明るさを求めることである。天体は点源であるが、大気の揺らぎによって像が広がる。カウント分布が十分小さくなるまでの領域を星の領域として、円の半径で 指定し、指定した面積内の画像のカウント値を積分して計算する。また、夜空からの光を評 価し、上記積分値から引くことで、天体の明るさを求めることが出来る。

開口測光には、すばる画像解析ソフト Makali'i を使用した。図 3.2 が Makali'i で解析し ている様子である。ピンクの円内の明るさが天体の明るさと空の明るさ、青の2つの円の間 の明るさが空の明るさとして、ピンクの円から求めた明るさから空の明るさを引くことに よって、天体の明るさを求められる。



図 3.2 Makali'i で解析している様子

3.3 大気減光補正

地上から観測をする際、天体が発した光は、観測者に届くまでに大気によって吸収・散乱 され大気減光を受ける。大気減光の大きさは、観測時の空の状態よっても変化するが、特に 光が通過した大気の量の影響を強く受ける。光が通過した大気の量を表わすものとして、エ アマスが使われる。エアマスとは、天頂にある星の光が通過する大気の量を1とした大気の 厚みのことである。観測する天体の高度が下がるとエアマスは増加する。以下にエアマス *X* と天頂角 z の関係式を示す。



図 3.3:エアマスの模式図

等級への変換

開口測光で求めた目標天体のカウント値 *Cobj*、太陽類似恒星のカウント値 *CsA* をそれぞれの露光時間 *tobj、tsA* で割ったものと、カタログに載っている太陽類似恒星の等級を用いて目標天体の等級を求めた。等級への変換は以下の式を用いた。ここで、*mobj* は求めたい目標天体の等級、*msA* はカタログ上のソーラーアナログの等級を表す。

$$m_{obj} = m_{SA} - 2.5 \log_{10}\left(rac{C_{obj}/t_{obj}}{C_{SA}/t_{SA}}
ight)$$

• 大気減光補正係数

以下の式を用いて大気減光係数 k を求めた。m は上記の式で求めた観測された等級、m₀ は本来の等級、X はエアマスである。もともと等級が分かっている太陽類似恒星を様々なエ アマスで観測することにより、B、V、R、I、400~900(Δλ=100nm)の各バンド・波長において それぞれ大気減光係数 k を求め、大気減光補正を行った。

$m = m_0 + kX$

3.4 反射率スペクトル

各波長における反射率 R は以下の式で求めることが出来る。反射率は観測対象の明るさ を入射する太陽光の明るさで割ることで求めることが出来るが、本研究では、太陽の代替と して太陽類似恒星の明るさを使用した。

また、明るさの比はカウント値の比であると近似することができる。単純に等級のまま比 を取ってしまうと、等級は輝度を対数スケールで表したものなので、値が変わってしまう。 そのため、大気減光補正後の目標天体と太陽類似恒星の等級を再度カウント値にそれぞれ 変換し、割り算を行った。今回、等級にしてから大気減光補正を行ったのは太陽類似恒星の カタログが等級表記だったためである。

$$R = \frac{L_{obj}^r}{L_{sun}^i} \cong \frac{L_{obj}^r}{L_{SA}} \cong \frac{C_{obj,0}}{C_{SA,0}}$$

ここで、 L_{obj}^{r} は観測対象の反射輝度、 L_{sun}^{i} は太陽から観測対象へ入る入射輝度、 L_{SA} は太陽 類似恒星の輝度を表す。 $C_{obj,0}$ 、 $C_{SA,0}$ はそれぞれ大気減光補正後の観測対象と太陽類似恒星 のカウント値を表す。

本研究では、反射率の絶対値については議論せず、反射率スペクトルの相対的な形のみを 比較した。反射率の絶対値を正確に求めるには天体の大きさが必要となるが、今回扱ったデ ブリは大きさがわかっていないためである。

4. 結果

今回実施した観測で十分な観測強度が得られたものは、2021年12月7日から12月9日 の3日間と2022年1月9日の計4日間で撮影した人工衛星1機(HIMAWARI-9)、使い捨 てロケット残骸1機(BREEZE-M)、衛星(EKRAN2)破片のデブリ1個のみであった。

各物体について、LCTF による観測1回とブロードバンドフィルターによる観測2回、 合わせて3回の観測を行うことが出来た。図4.1、図4.3、図4.5 に今回の観測から得られ た反射率スペクトルをそれぞれ示す。

LCTF で観測した反射率スペクトルについては透過波長帯の中心波長、ブロードバンド フィルターで観測した反射率スペクトルについては半値幅の中心で点を打った。反射率ス ペクトルは 550 nm で値が 1.0 となるように規格化してある。

また、図 4.2、図 4.4、図 4.6 に各物体の 3 本の反射率スペクトルを B、V、R、Iの代表 波長でそれぞれ平均化し、誤差棒をつけたグラフを示す。LCTF から得られた反射率スペ クトルは B、V、R、Iと異なる波長で点を打っているが、データ列の各区間で一次関数に よる観測値の内挿を行い、B、V、R、Iの代表波長での値を得た。誤差棒は標準偏差(±1 σ)を表す。

4.1 ひまわり9号



赤:Broadband (12月7日) 青:Broadband (1月9日) 禄:LCTF (12月7日)



誤差棒は標準偏差(±1g)を表す

4.2 BREEZE-M(使い捨てロケット)



図 4.3: BREEZE-M R/B (使い捨てロケット)の反射率スペクトル 赤: Broadband (12月8日) 青: Broadband (1月9日) 緑: LCTF (12月8日)



誤差棒は標準偏差(±1s)を表す



図 4.5: EKRAN2 DEB (デブリ)の反射率スペクトル 赤: Broadband (12月9日) 青: Broadband (1月9日) 緑: LCTF (12月9日)



5. 考察

5.1 ひまわり9号

ひまわり9号は気象庁が開発し、2016年に打ち上げに成功した静止気象衛星である。今 回観測された3本の反射率スペクトルのうち、12月7日のLCTFで撮影したものと1月9 日のブロードバンドで撮影した2本の形は類似していた。しかし、12月7日にブロードバ ンドで撮影した残りの1本だけは明らかに形が異なっていた。これは、ひまわり9号が太 陽電池と銀色のMLIに覆われたバス(本体)の2つの部分から構成されているためだと考 えられる。図5.1はひまわり9号のイメージ図である[気象庁,2014]。太陽電池は常に太陽の 方向を向いているため、観測時の位相角が異なれば太陽電池の見え方も変化し、太陽電池の 面積が全体の面積に占める割合も変化する。そのため、太陽電池が大きく見えたときと小さ く見えたときとで2つの異なった形状の反射率スペクトルが観測されたと推定される。



図 5.1: ひまわり 9 号の外観 [気象庁, 2014]

図 5.2 と図 5.3 は 2 種類の反射率スペクトルを、それぞれ太陽電池と銀色の MLI のスペクトルと比較した結果である。赤と緑の線は Schildknecht et al. [2017]らが観測した結果、青い線は本研究で推定した反射率スペクトルである。それぞれの反射率スペクトルの形は太陽電池と銀色の MLI のスペクトルとおおむね一致していると言える。



図 5.2: Schildknecht et al. [2017]らの銀色の MLI の反射率スペクトルとの比較



図 5.3: Schildknecht et al. [2017]らの太陽電池の反射率スペクトルとの比較

しかし、2 種類の反射率スペクトルを観測した時間帯は1時間半程度しかずれておらず、 太陽電池の見え方が大きく変化したためであるとは一概に言うことは出来ない。また、先行 研究ではどの位相角から観測しても太陽電池のスペクトルの影響が強くスペクトルの形に 現れるという報告もあった。今後観測を続けて行くことで、この2種類のスペクトルが生じ る原因についてより適確な考察をすることが可能になるが、現時点では単なる観測誤差で あると言う可能性も考慮する必要がある。

5.2 BREEZE-M

BREEZE-M はロシアで開発された上段ロケットである。2000 年にゴリゾント衛星の打ち上げに使用されたのち、そのまま静止軌道上に投棄されデブリとなり、今現在も静止軌道上を漂っている。図 5.4 は BREEZE-M の外観の画像である[Khrunichev state research and production space center, http://www.khrunichev.ru/main.php]。表面物質は白いペイントもしくはベータクロスにおおわれていると画像から推測することが出来る。ベータクロスとはガラス繊維にアルミ蒸着しテフロンコーティング加工がされたもので、表面は白く見える。そのため、白いペイントとベータクロスの反射率スペクトルの形はどちらも似たような平坦なものになるのではないかと想像できる。





図 5.5: Jorgensen et al., [2004]らの反射率スペクトルとの比較。 △: 白いペイントの上段ロケット 青線: BREEZE-M

http://www.khrunichev.ru/main.php]

図 5.5 は Jorgensen et al., [2004]らが観測した宇宙空間にさらされた白いペイントの上段 ロケットのスペクトルと今回の観測で得られたデータを比較したものである。反射率スペ クトルの形がおおよそ平坦である点は似ていると言える。しかし、今回の観測からは白いペ イントかベータクロスのどちらであるかの判断は難しいと考えた。また BREEZE-M はひま わり 9 号のように姿勢制御がされていないため、回転をしながら移動していると考えられ る。回転周期はわからないが、今回の観測では 10 分間程度の露光をしたため、複数回回転 していたのではないかと考えた。そのため白い部分だけでなく、それ以外の部分も含めた全 体を平均した反射率スペクトルが観測されたのではないかと考えた。

5.3 EKRAN2

EKRAN2 DEB は、ロシアの静止軌道衛星 EKRAN2 が爆発し粉々になった破片の一部で ある。今回観測した破片が衛星のどの部分にあたるかは定かではないが、反射率スペクト ルの形は BREEZE-M のものと似た特徴を持っている。そのため、表面は白くペイントさ れている、もしくはベータクロスで覆われているのではないかと考えた。

また、ひまわり9号とBREEZE-Mはエアマス1.2-1.5の間で観測されていたのに対し、EKRAN2は常にエアマス1.9と低い高度での観測になっていた。そのため、他の2つの物体よりも信号が弱く、全体的に平坦な形になってしまったとも考えられる。

5.4 ピリカ望遠鏡を用いた観測について

今回行った観測では主にブロードバンドフィルターを用いて観測しB、V、R、Iの4点から反射率スペクトルを求めることが出来た。本来であればLCTFを使ってさらに分解能を高めた観測を行う予定であったが、残念ながらLCTFを使った観測では十分な観測強度が得られなかった。図 5.6 は SAKURA2A という衛星を撮影した際の画像である。Vバンドで撮影した際には、10 分間の露光をして 14,000 カウントほどのカウント値が得られた。しかし、LCTF(850 nm)で 30 分観測した際には 2000 カウントほどしか得られなかった。

しかし、B、V、R、Iの4点から得られた反射率だけでも、反射率スペクトルの大まか な形を議論することは可能であり、表面物質を推定するだけであれば十分有効な手段であ るのではないかと考えた。



図 5.6: SAKURA 2A を LCTF とブロードバンドで撮影したもの (左) Vバンド、10分、約 14000 カウント (右) SNIR 850 nm、30分、約 2000 カウント

また、観測強度が足りないという問題のほかに、観測対象が見つからないという問題もあった。TLEトラッキングを用いて追尾を行った際、目標物体は本来視野の中心に現れるはずである。しかし、どれだけ長時間の露光をかけても見つからないということが度々あった。原因として目標物体が視野の外側にずれてしまっていたため見えなかったのではないかと考えた。

図 5.7、図 5.8 は目標物体が発見できなかった時の画像である。星が通過しているのが 確認できるので、追尾自体は問題無くできているはずである。もちろん単に目標物体が暗 すぎて中心にあるのに見えないという原因も考えられる。しかし、実際に今回の観測では かなりオフセットを大きめに入れて視野の外側を探した際に、何度か観測対象を見つける ことが出来た。そのため、TLE データの正確性にも問題があるのではないかと考えた。



図 5.7: COSMOS1897 DEB、Vバンド



図 5.8: ISO DEB、Vバンド

6. まとめと今後の課題

本研究では 2021 年 10 月から 2022 年 1 月にかけてピリカ望遠鏡を用いた宇宙飛翔体の反 射率スペクトルの観測を行った。上記の期間内で観測に成功したのは 12 晩の観測のうち 4 晩のみであったが、人工衛星(ひまわり 9 号)、使い捨てロケット(BREEZE-M)、スペース デブリ(EKRAN2)それぞれ 1 つずつの観測に成功した。観測には TLE データを用いた追 尾観測を行い、3 つの物体についてそれぞれ 3 本の反射率スペクトルを観測することが出来 た。ひまわり 9 号の反射率スペクトルは観測した日によって 2 つの全く異なった結果を示 した。これは、ひまわり 9 号を構成する太陽電池パネルと衛星バス部の銀色 MLI からの反 射光を、それぞれの観測で主に検出していたためではないかと考えた。BREEZE-M と EKRAN2 については反射率スペクトルがどちらも平坦で似通っていたため、白いペイント もしくはベータクロスなどの白い表面をしているのではないかと考えた。しかし、いずれの データも観測誤差が大きく、3 つのデータだけでは表面物質を正確に推定することは難しか った。今後も観測を続け、観測誤差を小さくして行くとともに、観測手順や観測時間の効率 的な使い方なども模索して行きたい。

また本研究では、衛星搭載部品のサンプルの分光観測を別途行い、ピリカ望遠鏡から得ら れた観測結果と比較することができなかった。今後は本研究では比較できなかった、ベータ クロスや、その他様々な衛星搭載部品のサンプルの反射率スペクトルを測定することで、よ り厳密に物質の同定が可能となると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

指導教官の佐藤光輝教授には、なかなか結果の出ない観測を最後まで温かく見守り、適切な 方向へ導いていただきました。研究の進め方や研究背景の重要性など、大変多くのことを学 ばせていただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

高木聖子特任助教には望遠鏡関連で様々な相談に乗っていただいたほか、天文台に連れて 行っていただくなど多くのことを学ぶ機会を与えてくださいました。ありがとうございま した。

その他 EOU の教員の皆様には、EOU セミナーを通して様々なアドバイスやご指摘をいただ きました。大変お世話になりました。

また遅くまで観測に付き合ってくれた大野辰遼さん、望遠鏡の扱い方や画像解析について 教えてくださった濱田築さん、佐藤佑樹さんにも厚く御礼を申し上げ、感謝の意を表します。

参考文献

- NASA Orbital Debris Quarterly News, (2021), 25 (1).
- Schildknecht T., R. Musci, and T. Flohrer, (2008), Properties of the high area-to-mass ratio space debris population at high altitudes, *Adv. Space Res.*, **41**, 1039-1045, doi:10.1016/j.asr.2007.01.045.
- Santoni F., E. Cordelli, and F. Piergentili, (2013), Determination of disposed-upper-stage attitude motion by ground-based optical observations, *J. Spacecraft Rockets*, 3, 701-708, doi:10.2514/1.A32372.
- 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.
- Jorgensen K., J. Africano, K. Hamada, et al., (2004), Physical properties of orbital debris from spectroscopic observations, *Adv. Space Res.*, **34**, 1021-1025, doi:10.1016/j.asr.2003.02.031.
- Bedard D. and G.A. Wade, (2017), Time-resolved visible/near-infrared spectrometric observations of the Galaxy 11 geostationary satellite, *Adv. Space Res.*, **59**, 212-229, doi:10.1016/j.asr.2016.08.033.
- Seitzer P., S.M. Lederer, H. Cowardin, T. Cardona, E.S. Barker, and K.J. Abercromby, (2016), Visible light spectroscopy of GEO debris, *In proceedings of AMOS technical conference, Maui, Hawaii, USA.*
- Vananti A., T. Schidknecht, and H. Krag, (2017), Reflectance spectroscopy characterization of space debris, *Adv. Space Res.*, 59, 2488-2500, doi:10.1016/j.asr.2017.02.033.
- Abercromby K., J. Okada, M. Guyote, et al., (2007), Comparisons of ground truth and remote spectral measurements of FORMOSAT and ANDE spacecraft, *In Proceedings of AMOS Technical Conference, Maui, Hawaii, USA*.
- Watanabe M., Y. Takahashi, M. Sato, S. Watanabe, T. Fukuhara, K. Hamamoto, and A. Ozaki, (2012), MSI: a visible multi-spectral imager for 1.6-m telescocpe of Hokkaido University, *Proceedings of the SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV.*, 8446, 844620, doi: 10.1117/12.925292.
- Cayrel de Strobel G., (1996), Stars Resembling the Sun, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 7, 243–288, doi:10.1007/s001590050006.
- Landolt A.U., (1973), UBV Photoelectric Sequences in SA 92-115, *Astronomical Journal*, 104 (1), 340-491.
- Landolt A.U., (1982), UBVRI standard stars around the Celestial Equator, *Astronomical Journal*, **88** (3).
- すばる画像解析ソフト Makali'i (マカリ) <u>https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja</u>
- 気象庁, (2014), 新しい気象衛星 -ひまわり 8 号・9 号-

• Khrunichev state research and production space center (<u>http://www.khrunichev.ru/main.php</u>)