

重ね合わせ法によるロシア提供軌道デブリの観測

黒崎裕久・柳沢俊史

JAXA

Observation of the Russia offer orbital debris by the Stacking method

Hirohisa KUROSAKI and Toshifumi YANAGISAWA

Abstract

We observed the small debris that Russia had made a catalog. We observed the area based on the orbit with the optical telescope of the Mt. Nyukasa. The search for the debris used the debris detection software that JAXA had developed. The first stage detected the debris by the Line-identification method, and detected bright debris. The second stage used the debris detection software of the stacking to detect the faint debris that could not be identified from the image. Five debris of eight debris were detected as a result of searching for the observed debris from the motion of the prediction.

Key Words: Space Debris, Observation, Telescope, Detection, Analysis

1 はじめに

静止軌道にある衛星は見かけ上、いつも同じ方向に見えるという利便性から、通信、放送、気象観測など、社会とは切り離すことのできないたくさんの人工衛星が利用している。しかし静止軌道は有限であるため運用終了後に、軌道遷移などのデブリ対策が行われている。ところが過去に打ち上げられたものや制御不能になったものはデブリとして飛び交っており、事故が起きる可能性が十分ある。これらの静止軌道の衛星やデブリを観測して、状況を把握することは重要であり、小さなデブリを早期発見することで、他の衛星への衝突防止対策を検討する必要がある。

2 微小デブリ

ここでいう微小デブリとは数十cmクラスのものである。今回の観測対象は、IADCにて議論された、ロシアでカタログ化されているデブリのうち比較的暗い微小デブリの予報値（日時における座標情報等）の提供を受け観測を行うこととした。これらのデブリはSpace Track提供の一般カタログには含まれていない。なお、同時期に美星スペースガードセンター（BSGC）でも観測を行っている。

3 観測

微小デブリの観測は、長野県伊那市の入笠高原にJAXA 研究開発本部が設置した入笠山光学観測施設（標高1870m）で行った。この観測施設は主に静止軌道上のデブリをはじめとして、衛星やGTOなどの観測

技術の研究開発のために設置されている^{1),2)}。今回の観測に用いたシステムは、観測施設の主要機器であるf/3.6 35cmニュートン式反射望遠鏡と400万画素(2K2K)裏面照射型高感度CCDカメラである。この望遠鏡とカメラの組み合わせで視野は1.27度角である。図1に入笠山光学観測施設の全景を示す。

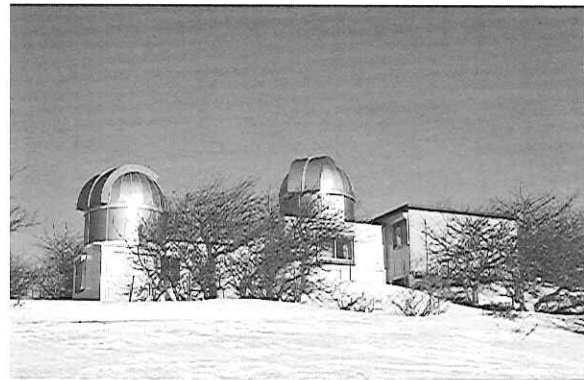


図1 入笠山光学観測施設の全景（冬期）

4 観測手法

観測は2010年3月19日の後半夜に、ロシアから提供された予報値（17個）の中から当日の観測条件の良い対象8個を選択して観測を行った。

静止軌道デブリを観測する際は、望遠鏡を目的の領域に移動したあと赤道儀を停止して、恒星時駆動せずに撮像する。地平座標を固定した視野になるので、軌道制御されている静止衛星ならば、ほぼ点像として写

る。図2に観測画像の一例を示す。1領域あたり3秒露出で18フレーム撮像するが、恒星は流れるため、そのままでは座標合わせの精度が悪い。そのため、短時間の1秒露出を1枚取得することで、位置合わせの精度を高めている。これらを1領域1セットとするが、画像をCCDカメラからPCへ転送する時間が1フレーム毎に必要なので、1セットの観測に費やす時間はおおよそ5分間である。今回は1つの対象デブリについて4セット観測した。観測当日はかなり風が強く、画像が安定しないものも多く含まれていた。

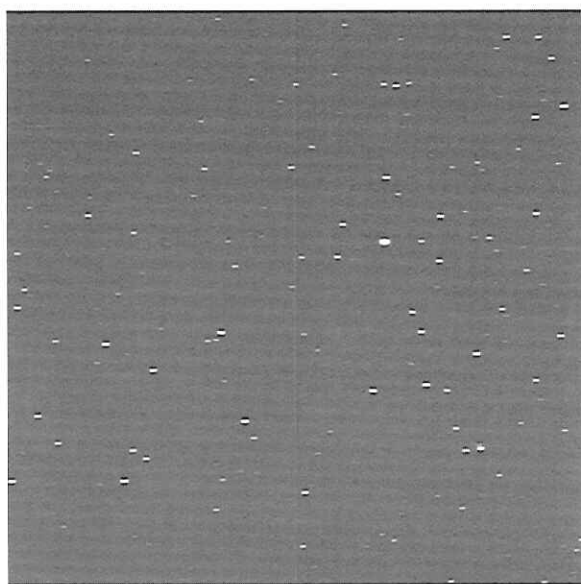


図2 観測画像の一例（3秒露出）

5 解析1（線分検出）

観測が終了すると、すぐにLinuxマシンでIRAFスクリプトによる解析を行う。これは連続して撮った画像フレーム1セットから、ある閾値以上のものを星像候補として検出し、観測開始から終了までの直線上にある像を検出するものである。この線分検出のイメージを図3に示す。この方法では1枚の画像からデブリ候補を検出するので、ノイズに埋もれるような暗い天体は検出できない³⁾。今回、検出できたのは8領域において3物体であった。その結果を表1に示す。線分検出の1領域探索にかかる時間は、Core2Duo E8400 3GHz、メモリ4GB搭載のデスクトップPC (CentOS5.4) で、おおよそ12分であった。候補を検出したあと座標決定して、軌道要素TLEを用いて既知衛星との同定を行う。

表1 線分検出でできたデブリ

90006 領域	71006A, 05046A (対象外)
90032 領域	90032 らしき物体, 他未知1個
90041 領域	90041 らしき物体

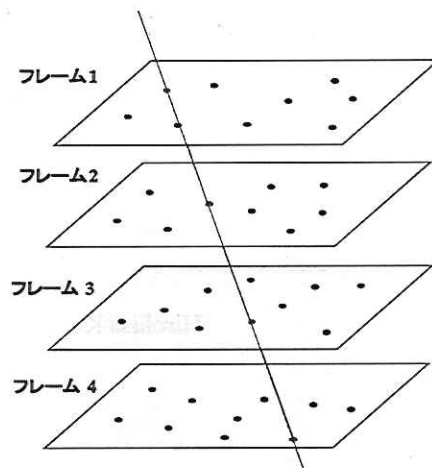


図3 線分検出法

6 解析2（重ね合わせ検出）

6.1 移動天体検出ソフト

次に、重ね合わせをもとにしたJAXA開発の移動天体検出ソフトを用いて解析を行った。このソフトはデブリの動き（モーション）を仮定して画像をシフトさせながら重ね合わせることで移動天体の検出を行うものである。これにより1枚の画像だけでは、ノイズに埋もれて確認することができないような移動天体（デブリ）を検出することができる。

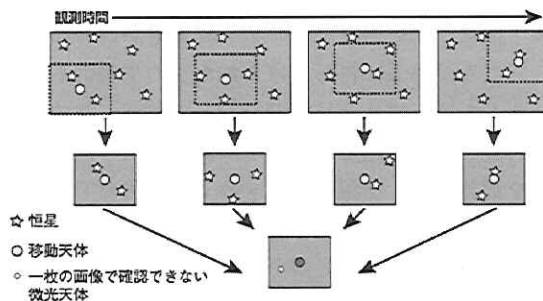


図4 重ね合わせ法

この移動天体検出ソフトは、デブリのほかに小惑星探索にも利用され、これまでに同観測施設において多くの暗い小惑星を発見していることから、多数の画像を使用すれば2倍の口径をもつ望遠鏡と同等以上の検出能力があることが実証されている。詳細においては過去の論文を参照されたい^{4),5)}。

移動天体検出ソフトを用いた実際の探索の流れを図5に示す。

前処理では、ダーク/フラット補正(画像のノイズ、ムラなどの補正)、固定視野マッチング(カタログとのマッチングで視野の特定)、スカイレベル補正(全画像の明るさを一定にする)、恒星マスク処理(恒星の除去)を行う。

前処理が終了した画像は、一次探索（モーションを仮定し画像を重ね合わせて検出）、二次探索（ノイズのふるい分け、ブリンク確認）、精測（座標と光度の測定）を行い、検出したデブリ候補の観測日時と赤道座標、地平座標、光度などを出力する。検出した候補は人工衛星同定（軌道要素からの既知衛星の同定）、星図表示（画像上での検出位置の表示）で確認する。

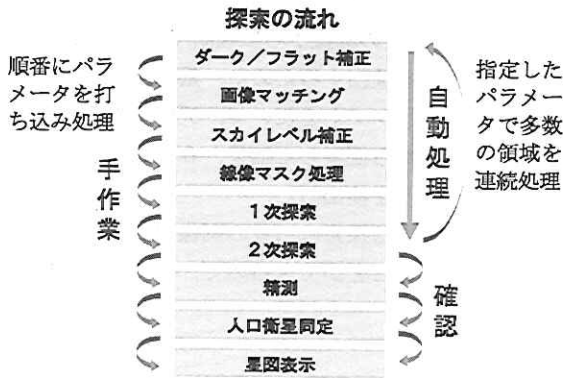


図 5 移動天体検出ソフトの自動化

移動天体検出ソフトは仮定したモーションをもとに画像を重ね合わせて検出を行うため、探索に用いる方向と移動量をパラメータとする必要がある。この検出ソフトでは、観測開始から終了までのピクセル値を移動量（x,y成分）として設定する。

今回は、提供された予報値を基に画像の取得時間の移動量を計算して探索パラメータとした。

デブリのモーションは時間とともに変化するため、その対象の観測時間における変化を考慮し、探索に用いるモーションに若干の幅を設定して探索を行った。

6.2 自動シーケンス処理

これまで、この検出ソフトは、手動で前述の各処理を順に行ってきたが、2010年度末に改良を行い、自動で処理を行うシーケンス機能を搭載した。あらかじめ探索に必要なパラメータをテキスト形式で記載しておくことで、連続して探索を行うことができる。このファイルは全ての探索に共通する探索用のパラメータファイルと各領域毎の座標マッチングのための個別情報などを記載したファイルの2つからなる。このシーケンス処理によって数十探索であっても、二次探索までを自動で処理するため、探索時間の大幅な短縮と人手を省けることになった。たとえば、ID作成から二次探索まで1領域当たり手動ならば少なくとも30分はかかる作業が、この自動シーケンス処理では2分程度で完了する。探索者はシーケンス処理終了後に二次探索において検出した候補を確認すればよく、検出状況に応じて

一次探索から手動でやり直せばよい。

6.3 検出結果

90006においては、観測領域から2つの天体を検出できたが、予報値とのモーションが異なり、同定処理をすると71006Aおよび05046Aで、観測対象のデブリではなかった。予報値では16.5等級と暗いのでノイズに埋もれ検出できない可能性がある。この観測の後半のセットは、観測領域が地球の影に突入して衛星食の状態になり、衛星やデブリ等が写っていなかった。

90031は4領域において予報モーションから16等級台の同一物体を検出できた。これは既知衛星と同定することができず、予報値とモーションが一致することから観測対象デブリである可能性が高い。1枚の画像から判断するのは難しく、また、ブリンクによって画像全体の中から探し出すのは不可能である。しかし、重ね合わせではうまく検出することができた。検出できた90031の画像を図6に示す。

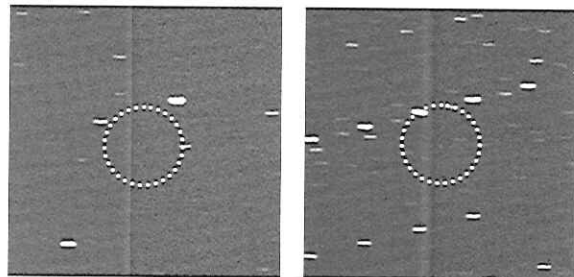


図 6 90031の画像

90032, 90041, 90008は4回の観測すべてのセットで検出できており、モーションおよび予報光度からも観測対象のデブリと思われる。

90036は4回の観測のうち2回は望遠鏡駆動の問題で観測できなかったが、2回は検出に成功した。モーション、等級も予報値に一致しているため、観測対象デブリと思われる。90036の画像を図7に示す。

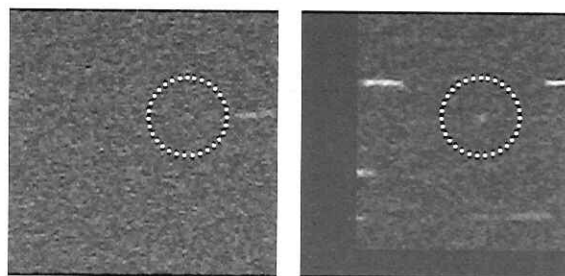


図 7 90036の画像

90183, 90055においては全ての観測セットで検出することはできなかった。

この両者は予報値ではおよそ17.0等級と他に比べて暗いため検出できなかったものと思われる。ただし、さらに閾値を下げて探索を行っていけば検出できる可能性は残されている。しかし視野に写っていない可能性も否定することはできない。

今回の移動天体検出ソフトでの検出結果を表2に示す。いずれの検出でも検出ソフトによって検出して測光した等級は予報値よりも暗めに出ている。そのため、予報等級が16.5等を超える対象については、検出が難しいことがわかった。

しかし、重ね合わせ探索では、目視によるリンクでは不可能な1枚の画像からは見つけられないデブリを今回のように検出することができる。デブリモードでは画像が18枚であるが、さらに増やせばこの効果はより出るものと思われる。現在のデブリ観測では32枚に増やしている。

7 まとめ

ロシアでカタログ化されている微小デブリの情報を受け観測を行った。ロシアから提供された軌道の予報値をもとに入笠山に設置してある光学望遠鏡で観測を行い、観測データ(画像)はJAXAが開発したデブリ検出ソフトを用いて対象デブリを探索した。

第1段階では、線分検出法によりデブリの検出を行い、比較的明るいデブリを検出した。

第2段階では、1枚の画像からは判断できないような、より暗いデブリを検出するために、重ね合わせをもとにしたデブリ検出ソフトを使用して、デブリの予報値によるモーションから探索した結果、8対象のうち5つの観測対象デブリを検出した。

重ね合わせによる探索は、1枚の画像で判断できないデブリも検出することができるので、その有効性は高いと思われる。

表2 デブリの検出状況

objectID	セット	観測開始時刻 UT			領域		予報値			検出物体							対象デブリ の可能性		
							移動量 X	移動量 Y	等級	移動量 X	移動量 Y	等級	同定	移動量 X	移動量 Y	等級		同定	
		h	m	s	Az	El													X
90006	001	15	10	20	212.50	43.50	55	424	16.5	81	430	13.7	71006A	1	-1	11.2	05046A	×	
	002	15	15	20	212.30	42.90	?	?		80	431	13.3	71006A	0	-2	10.1	05046A	×	
	003	15	20	20	212.30	42.60	53	416		79	427	13.3	71006A	1	-1	10.0	05046A	×	
	004	15	25	20	212.10	42.30				78	424	13.3	71006A					×	
	005	15	30	20	211.90	41.90				79	426	13.1	71006A					×	
	006	15	35	20	211.80	41.60				77	426	13.1	71006A					×	
	007	15	40	20	211.70	41.30				77	427	13.1	71006A					×	
	008	15	45	20	211.50	40.90													—
90031	009	15	50	20	233.90	39.30	33	402	15.9	36	406	16.6	-						○
	010	15	55	20	233.70	39.10	?	?		34	401	17.2	-	18	396	13.9	-		○
	011	16	0	20	233.40	38.80	39	412		37	409	16.4	-						○
	012	16	5	20	233.20	38.50				38	403	16.8	-						○
90032	013	16	10	20	234.30	34.90	53	419	12.9	54	424	14.9	-	-107	195	16.8	-		○
	014	16	15	20	234.00	34.60	?	?		51	423	14.6	-	-178	222	17.1	-		○
	015	16	20	20	233.80	34.30	51	425		51	422	15.2	-						○
	016	16	25	20	233.60	34.10				51	425	14.7	-						○
90041	017	16	30	20	244.80	35.60	-7	298	15.7	-4	298	15.3	-						○
	018	16	35	20	244.60	35.50	?	?		-1	306	15.6	-						○
	019	16	40	20	244.30	35.30	2	317		0	311	15.2	-						○
	020	16	45	20	244.10	35.10				2	315	15.3	-						○
90183	021	16	50	20	249.80	23.50	107	400	17.0										—
	022	16	55	20	249.70	23.20	?	?											—
	023	17	0	20	249.40	22.90	130	399											—
	024	17	5	20	249.30	22.60													—
90008	025	17	10	20	246.00	24.00	36	410	16.3	36	410	16.4	-						○
	026	17	15	20	245.70	23.70	?	?		38	409	16.8	-						○
	027	17	20	20	245.50	23.50	39	412		37	415	16.5	-						○
	028	17	25	20	245.20	23.20				42	408	16.7	-						○
90036	029	17	30	20	160.80	35.40	-67	52	15.8										—
	030	17	35	20	160.80	35.40	?	?											—
	031	17	40	20	160.80	35.30	-71	23		-67	37	17.2	-						○
	032	17	45	20	160.70	35.30				-62	29	16.6	-						○
90055	033	17	50	20	166.50	31.90	-314	238	16.7										—
	034	17	55	20	166.30	31.70	?	?											—
	035	18	0	20	166.00	31.40	-344	181											—
	036	18	5	20	165.80	31.30													—

*移動量は1セット観測時間における画像でのピクセル量

参考文献

- 1) 黒崎裕久, 中島厚, 柳沢俊史, 静止デブリ観測用光学観測施設, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-07-011, 2008.
- 2) 黒崎裕久, 中島厚, 入笠山光学観測所におけるスペースデブリ検出技術の開発, 第51回宇宙科学技術連合講演会2F16, 札幌, 2007
- 3) Toshifumi Yanagisawa, Hirohisa Kurosaki and Atsushi Nakajima, Activities of JAXA's Innovative Technology Center on Space Debris Observation, AMOS 2009.
- 4) 柳沢俊史他, 重ね合わせ法による微小静止デブリの検出, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.51, No.589, pp.61-70, 2003
- 5) Yanagisawa, T., et al, Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects, *Publ. Astron. Soc. Japan*, Vol57, pp.399-408, 2005

(2011年1月13日受付, 2011年5月1日受理)