

## 静止軌道デブリ観測の高効率化の検討

上津原正彦<sup>1)</sup>・藤田浩輝<sup>2)</sup>・Michael A. Shoemaker<sup>1)</sup>・平山寛<sup>2)</sup>・花田俊也<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻 <sup>2)</sup>九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門

### Improving the efficiency of GEO debris observation

Masahiko UETSUHARA<sup>1)</sup>, Koki FUJITA<sup>2)</sup>, Michael A. Shoemaker<sup>1)</sup>, Hiroshi HIRAYAMA<sup>2)</sup>, Toshiya HANADA<sup>2)</sup>

### Abstract

Our study focuses on improving the efficiency of ground-based optical observations of orbital debris around geosynchronous orbit (GEO). The overall goal is to contribute in the creation of an independent Japanese debris catalogue. The study consists of two approaches. The first approach is the modeling of the orbital debris environment. The debris modeling methods are applied to debris observations obtained from Nyukasa observatory. This paper compares real observations with undetected debris data from possible breakups. The second approach is to improve the image processing performance required for debris detection. New algorithms are applied to the existing debris detection algorithm called the stacking method. Finally, this paper also shows our planned debris observation system at Kyushu University.

**Key Words:** Orbital debris, GEO, Optical observation, Modeling, Image processing

### 1 背景

2009年1月現在、静止軌道近傍（高度29,049-43,082km）で観測されてカタログに登録されている、サイズ1m以上の人造物は約1300個になる<sup>①</sup>。そのうち381個の人造物は運用中と推定されているが、ほかは不要の人造物、つまり宇宙ゴミと推定されている。米航空宇宙局（以下「NASA」と略す）は観測能力約60cm以上の、また欧州宇宙機関（以下「ESA」と略す）は約10cm以上の光学望遠鏡を導入し、カタログ数の4倍以上の人造物体を観測している<sup>②③</sup>。2007年8月現在までに報告されている破碎現象はわずか2例であり、上記の人造物を説明するためには、少なくとも11例の未確認の破碎現象が必要とされている<sup>④</sup>。宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」と略す）では、観測能力約100cmの光学望遠鏡を導入し、ソフトウェア的に観測能力を約50cmにまで向上させている<sup>⑤</sup>。JAXAの手法では、ノイズに埋もれた人造物を複数枚の画像を重ね合わせて検出するため、人造物の移動に関してあらゆる方向と速度を仮定する必要があり、膨大な計算量を必要とする。一方、静止軌道近傍の人造物の観測計画は、既に観測され、軌道が同定されているサイズ1m以上の人造物の分布状況を参考に最適化されている。我々の研究グループが、静止軌道近傍のスペースデブリ環境について、粒子衝突実験及び数値シミュレーションの両方から研究

を進め、開発した静止軌道近傍スペースデブリ環境推移モデルを用いて解析した結果、破碎現象で発生する破片は、破碎源の人工物とは異なる軌道推移を経験する。現在の観測計画は、サイズ1m以下の人工物に最適化されておらず、静止軌道上の破碎現象で発生したスペースデブリを効果的に発見できる掃天方法を、実観測で検証する必要がある。

### 2 研究ロードマップ

九州大学が取り組むデブリ観測の効率化のアプローチは、デブリ環境モデリングによるアプローチと、画像処理を用いたデブリ検出によるアプローチに大別される。それぞれのアプローチを纏めた研究ロードマップを図1に示す。

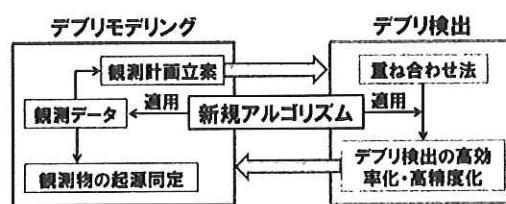


図1. 研究ロードマップ

本研究では、静止軌道の観測効率の向上を図ることを目的としている。デブリモデリングでは、新規アル

ゴリズムにより、宇宙機の破碎によってデブリが発生した可能性のある領域を観測する計画を立案する。また、従来の画像処理によるデブリ検出方法に対して新規アルゴリズム理論を適用することにより、デブリ検出の高効率化・高精度化を図る。両アプローチ間のフィードバックにより最終的に観測物体の起源特定数を増やし、日本独自のデブリカタログ構築へ貢献する。

### 3 観測へのデブリモデリングの適用

#### 3.1 軌道プロバゲータ

今回の解析では、観測物体ならびに仮想デブリの軌道伝播を、解析解を用いて計算する。その際に、地球ポテンシャル、第三天体（月・太陽）による摂動を考慮する。静止軌道付近の高度では、上記の摂動の他に太陽輻射圧の影響を考慮すべきである。しかし、観測物体のデータについて面積質量比や離心率を適切に仮定しなければ、その摂動の影響を評価出来ない。今回の解析は、研究アプローチの効果の確認を目的とした予備検討であるため、軌道計算において太陽輻射圧による摂動は考慮しない。

#### 3.2 デブリ破碎モデル

宇宙機の破碎を模擬し、デブリを生成するモデルとして、NASA標準破碎モデルを用いる。このモデルで模擬可能な破碎モードには、宇宙機の爆発による破碎（爆発破碎）と、2物体間の衝突による破碎（衝突破碎）がある。両モードにおいて、破碎で生成されるデブリは、破碎前の親物体を中心に等方的にランダムに生成・拡散される。今回の解析では、爆発破碎を仮定する。爆発破碎の規模を表すパラメータとして、スケールファクタ  $S$  ( $0 < S \leq 1$ ) がある。ここで、 $S=0$ では破碎が起こらない状態であり、 $S=1$ では爆発規模が最大となり親物体が完全破碎する状態である。

#### 3.3 静止軌道近傍での破碎現象候補

今回解析を行う2件の特徴的な破碎現象候補を表1に示す。これら2件共に、ロケット上段機体Titan3C Transtageの爆発破碎現象と推測されている<sup>6</sup>。表中には明記していないが、これらの物体の破碎時の軌道長半径や離心率は、静止軌道近傍の値である<sup>6</sup>。

表1. 破碎現象候補<sup>6</sup>

ID	推定破碎日	破碎直前の推定軌道面要素	
		傾斜角	昇交点赤経
76023F	76.Oct.9	25.349°	10.998°
73040B	81.Mar.8	5.867°	62.846°

静止軌道は、地球ポテンシャルと月・太陽の第三天体の摂動の結合により、軌道傾斜角0~15度の範囲で約53年周期の歳差運動を起こすことが知られている。軌道傾斜角の観点から、この歳差運動の領域外で破碎が起こった可能性のある76023Fと、中立点（軌道傾斜角~7.5°）付近で破碎が起こった可能性のある73040Bの2件の解析を行う。それぞれの爆発破碎の規模は、今回の解析では最悪条件を仮定して、 $S=1$ とした。

#### 3.4 現状の観測域と仮想デブリ雲の照合

笠山で2008年~2009年初頭にかけて観測された総数約700個の物体と、2件の破碎候補から生成した仮想デブリ（各約240個）の現在付近（2010年1月1日）の予想位置を軌道面の観点から比較した。昇交点赤経-軌道傾斜角座標系でのプロット結果を図2に示す。

現在の観測物体は、物体の起源が特定されたCTと未特定のUCT共に、静止軌道（GEO）歳差運動領域に集中して分布している。この領域に含まれる形で、73040B由来のデブリが分布している。また、現状の主な観測物体領域とは異なる新領域に76023F由来の仮想デブリ

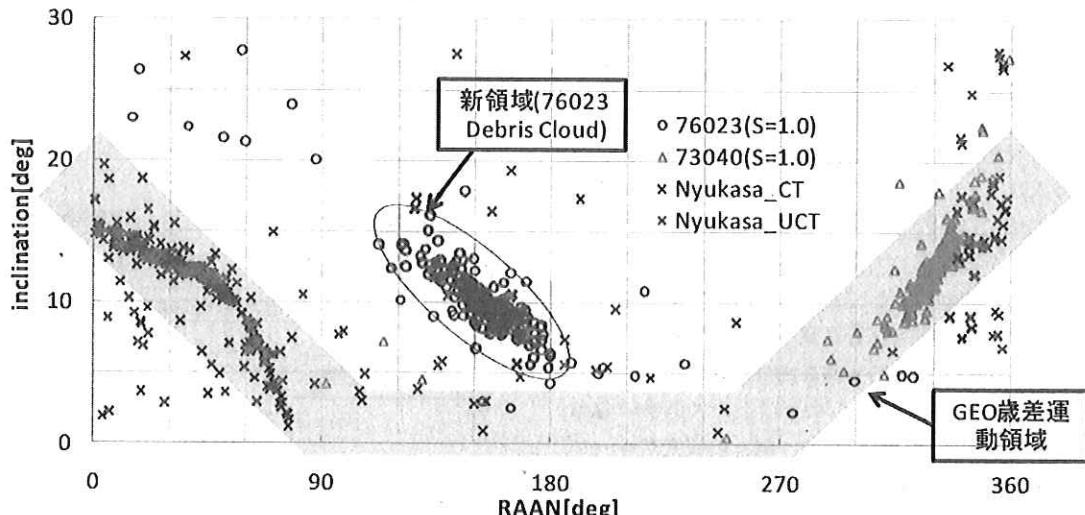


図2. 破碎候補の仮想デブリと観測物体の分布（2010年1月1日）

## 静止軌道デブリ観測の高効率化の検討

リが分布している。この新領域を重点的に観測することにより、未知デブリの更なる発見と共に高軌道傾斜角での破碎現象を裏付けられる可能性がある。

図2中のUCTが、新領域に密集する76023F由来デブリである可能性を調査するために、各軌道要素を76023Fの推定破碎発生直後まで逆伝播した結果を図3に示す。

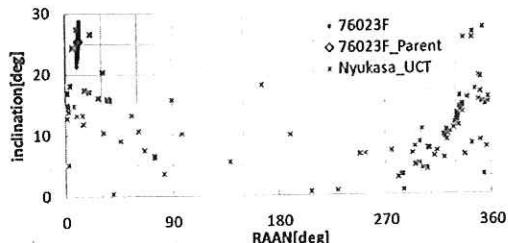


図3. 逆伝播結果

仮想デブリ近傍に3つのUCTが接近している。しかし、これらのUCTは仮想デブリのように爆発破碎直後に見られる形状に分布しておらず、この破碎に由来するものであるとは現段階では特定できない。相関を調査するためには、新領域近傍での観測数を増やす必要がある。また、76023F由来の推定破碎領域以外にも、昇交点が330度近傍の領域に破碎直後の分布形状に似た形でUCTが分布している。これらは何らかの破碎に由来する可能性がある。今回の2件以外の破碎現象候補との比較等、今後更なる調査が必要である。

実際の観測で今回の仮想デブリの見え方を把握するために、図3のプロットデータを、入笠山観測所視点の方位角一仰角座標系に変換して再プロットを行った予想天球図を図4に示す。

今後、破碎候補の解析ケースをさらに増やすことによ

り、デブリの存在確率密度を表すデブリ予報天球図を生成し、効果的な観測計画の立案に生かす。

### 4 高速画像処理によるデブリ検出の高速化

過去にJAXAで開発された「重ね合わせ法」<sup>15</sup>では、光学望遠鏡による複数枚の観測画像データに対して、同じ画像座標における輝度値の中央値（メディアン）をとることで、他の恒星画像と比較して暗く、動きの少ない静止衛星やデブリのような人工物体の画像を効率よく抽出している。ただし、デブリのように軌道運動を伴う物体を抽出する場合、その動きによる画像上の対象物体の位置のずれを補正する必要がある。現在の手法では、上記補正を可能のある全ての方向および移動量について探索することで実現しており、数百枚の画像を処理する上で効率的とはいえない。

上記の問題点に対するソリューションとして、現在九州大学独自でデブリ検出の高効率化・高精度化を実現する新規アルゴリズムの開発を進めている。今後、新規アルゴリズムを重ね合わせ法に組み込み、実運用での実証を行っている予定である。

### 5 九州大学のデブリ光学観測設備

九州大学では、デブリ観測の研究を本格化させるために、今年度よりデブリ光学観測設備の導入準備を進めている。まず、今年度は研究の簡易実証のために九州大学でφ20cmのニュートン式反射望遠鏡を導入した。この反射望遠鏡と、1k1kのCCDカメラを用いて大学敷地内で静止軌道上の衛星のテストショットを行った。その撮影画像を図5に、その際の撮影条件を表2に示す。テストショットでは、約13等級の明るさで人工衛星(SSC26056)を捉えることに成功した。SSC26056は2006年に定常運用を停止した米国の商用通信衛星であり、現在は静止軌道上をドリフトしている。

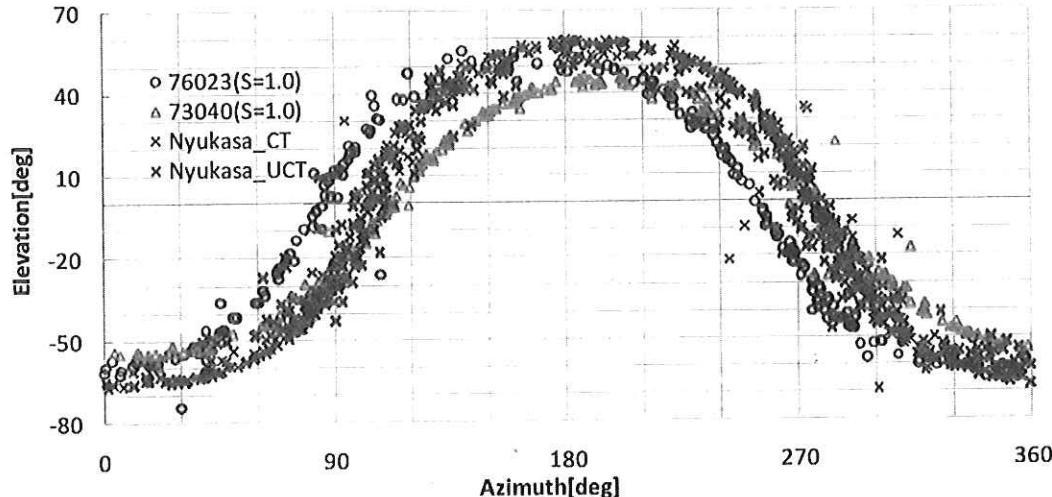


図4. 入笠山観測所からの天球予想図 (2010年1月1日午前0時0分JST)

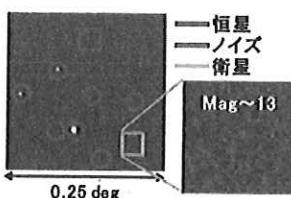


図5. テストショットで捉えた人工衛星(SSC26056)

表2. 撮影条件

望遠鏡	鏡筒 : R200SS (Vixen), Φ20cm, f80cm ニュートン反射式, 極限等級:13.3 Mag 赤道儀 : GPD2 (Vixen)
CCDカメラ	ST1001E (SBIG), 空冷(ペルチェ, ファン), 1024 × 1024 pixel
撮像	露光:1秒, 補正:ダークフレーム

今後、九州内の高等教育機関の連携によりデブリ光学観測の共同観測体制作りを進めていく。現在の計画では、平成22年度に北部九州にデブリ観測に特化した観測システム（ハードウェアとしては、Φハードウエア望遠鏡、冷却CCDカメラ、ドーム、望遠鏡遠隔制御システム、画像処理用計算機等から構成）を導入し、デブリの定常観測を開始する予定である。

## 6 まとめ

九州大学が取り組む静止軌道デブリ観測の高効率化を図る2つのアプローチを紹介した。デブリモデリングのアプローチにおける予備検討により、高軌道傾斜角で発生するデブリは現在の観測物体が多く集まる領域とは異なる領域に分布することが判明した。デブリ検出のアプローチでは、従来のデブリ検出方法の高効率化・高精度化を図る新規アルゴリズムを提案した。

## 謝辞

本研究は、JAXAの柳沢俊史氏による多大なるご支援、ご協力により実現することができました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Choc, R., Jahn, R., Classification of Geosynchronous Objects, ESA ESOC, Issue 11, 2009.
- 2) Africano, J.L., Sydney, P.F., Jarvis, K.S., Stansbery, E.G., Mulroney, M.K., CCD Debris Telescope Observations of the Geosynchronous Orbital Debris Environment, NASA L.B. Johnson Space Center, 2000.
- 3) Schildknecht, T., Hungnetobler, M., Ploner, M., First GEO Survey Test Observations with the ESA 1 m Telescope in Tenerife, Proceedings of the 2000 Space Control Conference, pp.73-79, 2000.
- 4) Oswald, M., Wegener, P., Stabroth, S., Wiedemann, C., Rosebrock, J., Martin, C., Klinkrad, H., Vorsmann, P., The MASTER 2005 Model, Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Conference on Space Debris, pp.235-242, 2005.
- 5) Yanagisawa, T., Kurosaki, H., Nakajima, A., "The Stacking Method": The Technique to Detect Small Size of GEO Debris and Asteroids, JAXA Research and Development Report, 2008.
- 6) Sochilina, A., Kiladze, R., Grigoriev, K., Molotov, I., Vershkov, A., On the orbital evolution of explosion fragments, Advances in Space Research, Volume 34, pp.1198-1202, 2004.

(2009年12月21日受付, 2010年1月15日受理)