

## 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以上の人工物は約1300個になる<sup>1)</sup>。そのうち381個の人工物は運用中と推定されているが、ほかは不要の人工物、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倍以上の人工物体を観測している<sup>2)</sup>。2007年8月現在までに報告されている破砕現象はわずか2例であり、上記の人工物を説明するためには、少なくとも11例の未確認の破砕現象が必要とされている<sup>3)</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>4)</sup>。JAXAの手法では、ノイズに埋もれた人工物を複数枚の画像を重ね合わせて検出するため、人工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、静止軌道近傍の人工物の観測計画は、既に観測され、軌道が同定されているサイズ1m以上の人工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、破砕現象で発生する破片は、破砕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、静止軌道上の破砕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。

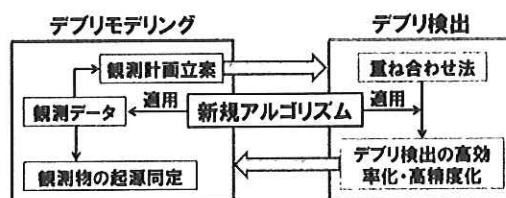


図1. 研究ロードマップ

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、宇宙機の破砕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 軌道プロパゲータ

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 デブリ破砕モデル

宇宙機の破砕を模擬し、デブリを生成するモデルとして、NASA標準破砕モデルを用いる。このモデルで模擬可能な破砕モードには、宇宙機の爆発による破砕（爆発破砕）と、2物体間の衝突による破砕（衝突破砕）がある。両モードにおいて、破砕で生成されるデブリは、破砕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、爆発破砕を仮定する。爆発破砕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、 $S=0$ では破砕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砕する状態である。

#### 3.3 静止軌道近傍での破砕現象候補

今回解析を行う2件の特徴的な破砕現象候補を表1に示す。これら2件共に、ロケット上段機体Titan3C Transtageの爆発破砕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、これらの物体の破砕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. 破砕現象候補<sup>6</sup>

ID	推定破砕日	破砕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砕が起こった可能性のある76023Fと、中立点(軌道傾斜角~7.5°)付近で破砕が起こった可能性のある73040Bの2件の解析を行う。それぞれの爆発破砕の規模は、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

入笠山で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件の破砕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。昇交点赤経一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

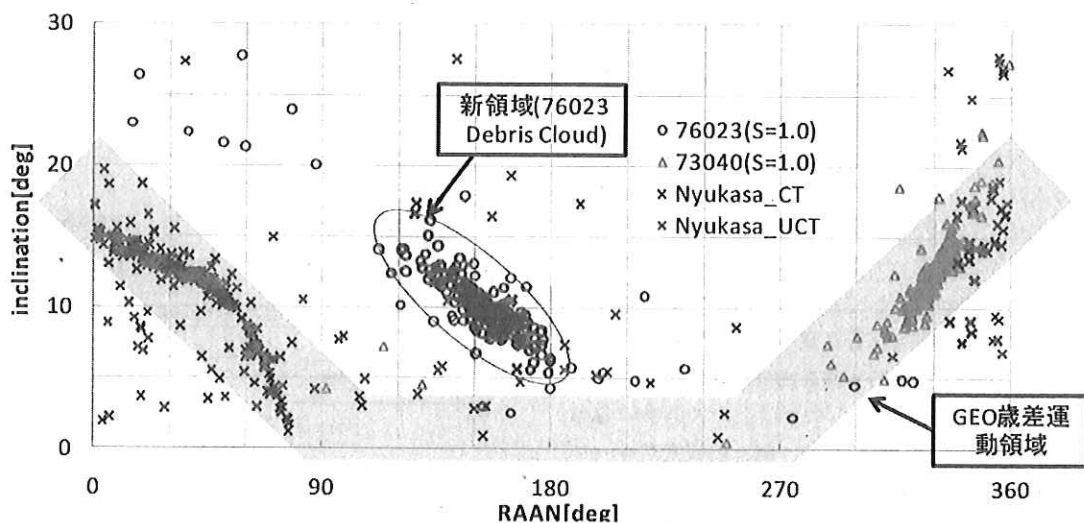


図2. 破砕候補の仮想デブリと観測物体の分布 (2010年1月1日)

## 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。

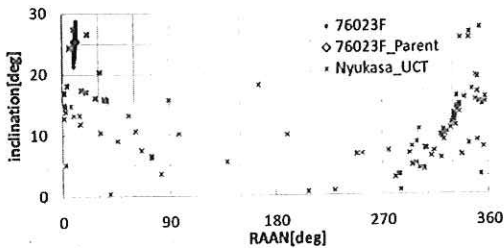


図3. 逆伝播結果

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とは现阶段では特定できない。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-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>(6)</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、上記補正を可能性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、数十枚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。

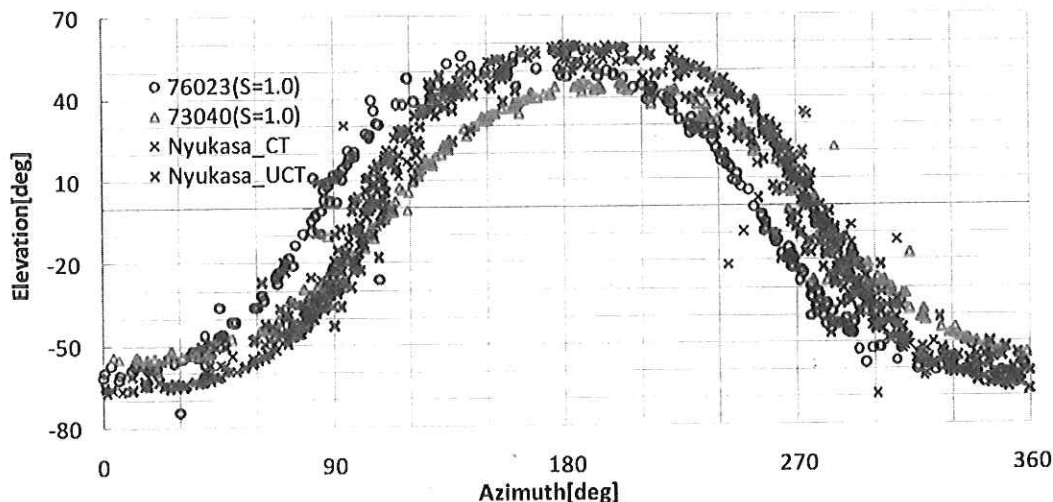


図4. 入笠山観測所からの天球予想図 (2010年1月1日午前0時0分JST)

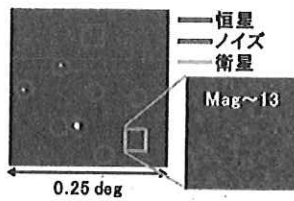


図5. テストショットで捉えた人工衛星(SSC26056)

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出来ました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Choc, R., Jehn, 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)

## はやぶさ2ミッション計画

吉川 真、「はやぶさ2」プリプロジェクトチーム  
宇宙航空研究開発機構

### Hayabusa-2 Mission Project

Makoto YOSHIKAWA, Hayabusa-2 Preproject Team  
Japan Aerospace Exploration Agency

#### Abstract

Asteroid sample return spacecraft Hayabusa was launched in 2003, and at present (Feb. 2010) it is on the way back to the earth. Hayabusa has revealed many new things for a small near earth object, but still there are a lot of mysteries in asteroids. Therefore, we are planning a next sample return mission, Hayabusa-2. Hayabusa-2 also will explore a small near earth asteroid whose spectral type is C-type. We think that C-type asteroid has organic material and water, so it is important to understand the origin of the life. It is also important from the point of spaceguard. We hope we can start Hayabusa-2 mission as soon as possible.

Key words: Hayabusa, Exploration, Asteroid, Sample return

#### 1 はじめに

小惑星探査ミッション「はやぶさ」は、世界で初めて小惑星からその表面物質を持ち帰ろうとしている小惑星サンプルリターンミッションである。「はやぶさ」は、2003年に打ち上げられ、2005年には小惑星イトカワに到着し、その不思議な世界を我々に示してくれた。そして、2回のタッチダウンの試みをした後、燃料漏れというトラブルに見舞われ、当初の地球帰還予定から3年遅れて2010年6月に地球に戻るスケジュールで運用されているところである。現在(2010年2月)、いろいろなトラブルは抱えているものの、「はやぶさ」は地球帰還に向けた作業が続けられている。ここでは、「はやぶさ」の成果について詳細は割愛するが、その成果を一言で言えば「微小な地球接近小惑星の概念を変えた」ということであろう(図1)。これは、日本が世界に誇る成果である。

「はやぶさ」の後継となるミッションについての検討が進められている。それが「はやぶさ2」である。「はやぶさ2」についての詳細は、この後の章で解説するが、「はやぶさ」と同様な小惑星サンプルリターンのミッションである。ただし、ターゲットとなる小惑星は、C型に分類されるものであり、有機物や水を含んでいると考えられているものである。「はやぶさ」が探査したイトカワはS型の小惑星であるが、C型はS型と並んで小惑星の主要なタイプである。小惑星の全体像を把握するためには、まずはS型とC型の小惑星をおさえておく必要がある。さらに、C型

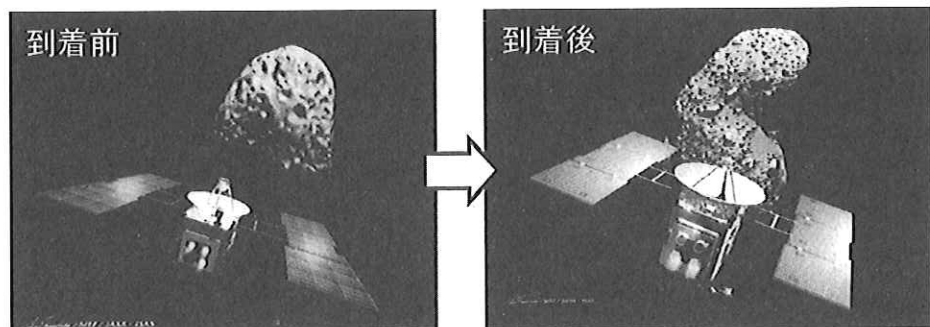


図1：はやぶさの成果  
地球軌道に接近する微小小惑星の概念が、「はやぶさ」のイトカワ探査で大きく変わった。

この成果を受けて、「はやぶ



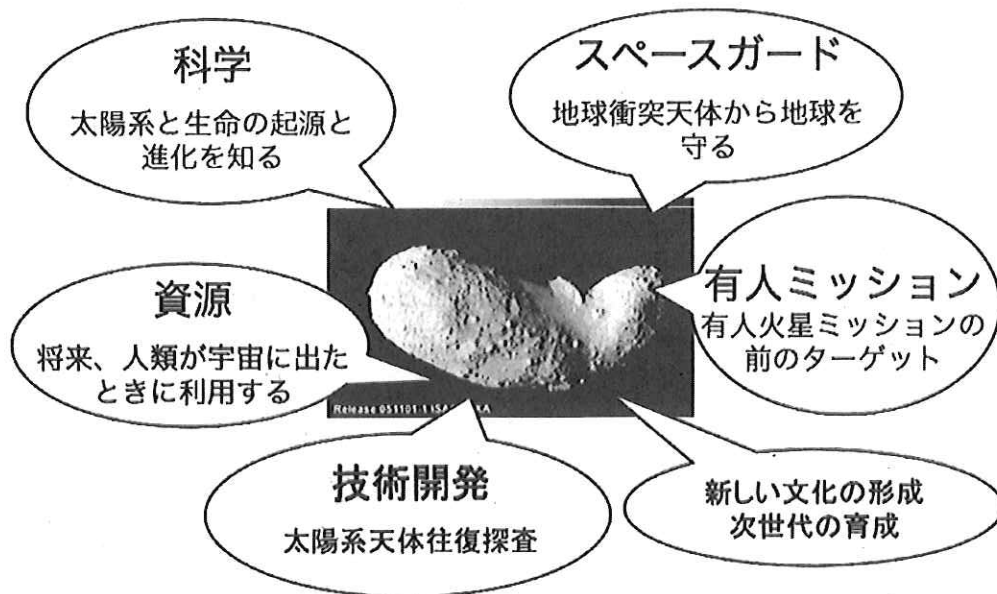


図2 太陽系小天体探査の意義

小惑星は、地球生命の起源を考える上でも興味深いものである。

「はやぶさ2」のさらに次に行うべきミッションとして「はやぶさ Mk2」と呼ばれるミッションの検討も同時に進められている。これは、より始原的な天体のサンプルリターンを目指そうという野心的なものであり、小惑星のタイプで言えばD型小惑星、あるいは、すでにガスを放出しなくなってしまった枯渇彗星からのサンプルリターンを目指すものである。「はやぶさ Mk2」は、ヨーロッパとの共同ミッションとして「マルコ・ポーロ」という名前でも検討されている。「はやぶさ Mk2」については、また別の機会に紹介することにした。

ところで、このように太陽系小天体を連続的に探査する目的は何なのであろうか。太陽系小天体は、惑星のように大きな天体とは違って、太陽系形成時からあまり進化していないと考えられている。つまり、太陽系の誕生の時の状況を知ることができるのである。科学としては、太陽系や生命の起源やその進化を知るといった大きなテーマに取り組むことができる。一方、小天体は地球衝突問題というスペースガードの立場や、宇宙資源、有人ミッションのターゲットとしても注目を浴びている。また、全く未知である天体への探査は、現代の「冒険」であり、新しい世代への育成へともつながるものである。これらの意義をまとめたものが図2である。

以下では、特に「はやぶさ2」の現在までの検討について紹介する。

## 2 「はやぶさ」から「はやぶさ2」へ

はやぶさ後継ミッションについては、「はやぶさ」が打ち上がる前の2000年くらいから、すでに検討は始まっていた。ただし、「はやぶさ2」についての検討が本格化し

たのは、2005年に「はやぶさ」がイトカワに到着して探査を行ったが、予定通りのやり方で表面物質が採取できなかったという事実の後である。確実に小惑星の表面物質を持ち帰るということを目指して、「はやぶさ2」の検討は開始された。当初は、「はやぶさ」と同型の探査機を早期に作成して、2010年ないし2011年の打ち上げを目指していた。対象天体は、後で説明するが、1999 JU3というC型小惑星である。

まず、「はやぶさ」で経験した不具合に対処するための検討が行われ、特に姿勢制御のためのリアクションホイールや燃料を送る配管の配置など再検討が行われた。その結果、2010年ないし2011年での打ち上げに間に合っただけでなく、探査機の製作が可能になった。しかし、予算上の問題でこの打ち上げウインドウに間に合わせるができず、次の打ち上げウインドウである2014年を目指すことになった。打ち上げが延期されたこともあって、「はやぶさ」と同じミッションのみ行うのではなくて新規の探査もを行い、サイエンスのアウトプットをより多く引きだそうという検討がなされた。以下では、現時点まで行われた新たな検討内容について紹介する。

## 3 はやぶさ2計画の概要

「はやぶさ2」は、すでに述べたように微小なC型の地球接近小惑星を探査し、その表面物質を地球に持ち帰ろうとするサンプルリターンミッションである。その目的は、大きく言えば「我々はどこから来たか」を調べることである。つまり、太陽系と生命の起源・進化を調べることになる。特に、C型の小惑星は有機物や水に富んでいると思われているため、生命・海・地球の原材料物質を調べるという点において大きな進展が期待できる。また、イトカワと同様に微小小惑星を調べることは、太陽

はやぶさ2 ミッション計画

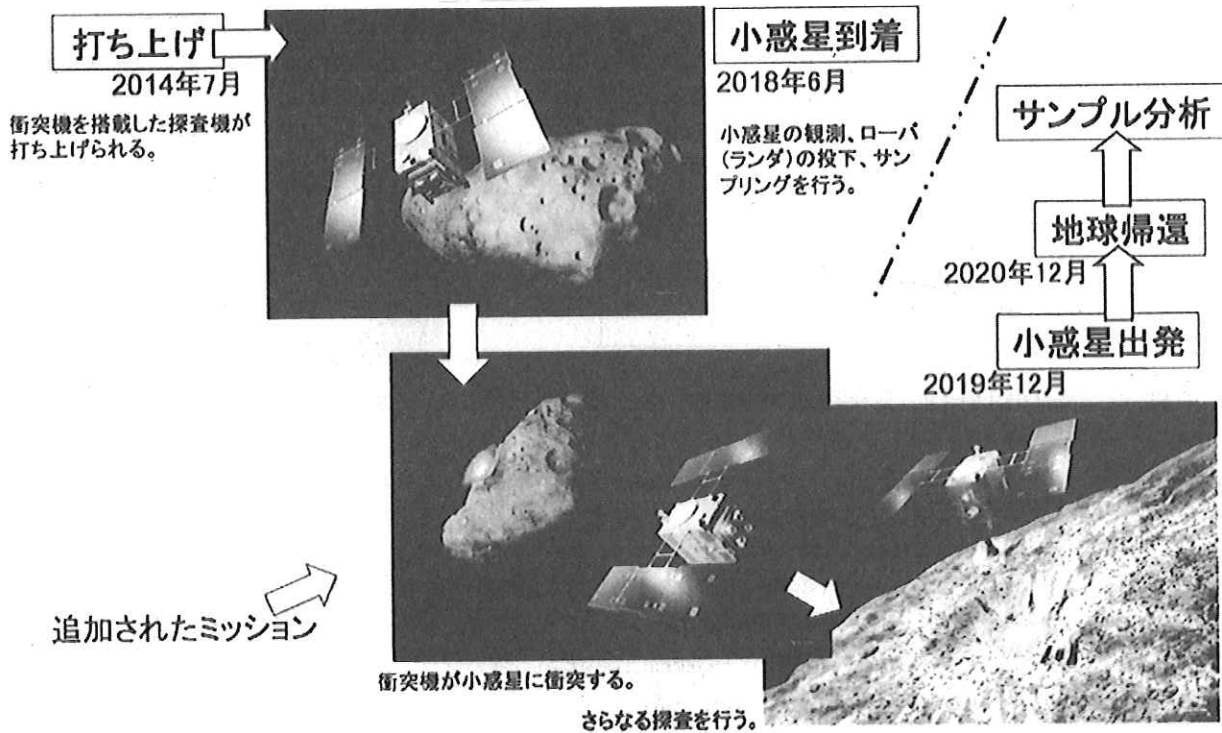


図3 「はやぶさ2」のミッションシナリオ(案)

系天体の形成過程を調べることになる。

さて、この「はやぶさ2」は、最初は「はやぶさ」と同型機によって同じようなミッションを行うものであったが、「衝突機」を追加するという検討が新たになされた。「衝突機」とは、その名前の通りに小惑星に衝突するものである。衝突することによって、人工的なクレーターを作ることができるが、そのことで小惑星の内部物質を調べようとするものである。「はやぶさ」のようなやり方では、小惑星の表面物質は採取できるが、地下の物質は採取できない。表面物質は、太陽光によって変質したり宇宙風化を受けたりしている可能性がある。したがって、小惑星の地下物質を採取して分析できれば、さらに太陽系の起源に近い物質を得ることができる可能性があるのである。

「衝突機」については、いくつかのスケールのものが検討された。最も大きいものとしては、単独の探査機が衝突機になるものである。これは、打ち上げのときに2機の探査機を打ち上げ、片方は「はやぶさ」と同様な探査を行い、もう片方が小惑星に衝突するというものである。この場合には、例えば、300kg くらいの探査機を3~4km/sの相対速度で小惑星に衝突させることができる。すると直径が数十メートルのクレーターを作ることができると考えられる。この場合の問題点は、衝突機の軌道制御の精度であるが、仮にうまく軌道制御できたとしても、特定の場所に衝突させることは難しい。また、軌道で衝突の時刻が決まってしまうため、衝突の時期を選ぶこと

も難しい。さらには、探査機本体が衝突するので、小惑星表面を汚染してしまうことは避けられない。また、コストも高額となる。

このように問題となる点がいくつかあるので、小型の衝突機についても検討が行われた。これは、探査機に小さな衝突機を搭載しておき、小惑星に到着してから衝突機を切り離して小惑星に衝突させるというものである。この場合には、衝突の場所や時期を選ぶことができるし、衝突による汚染も比較的少なくて済む。さらに、コストも、単独の衝突機よりはかなり低くなる。ただし、形成されるクレーターは小さく、直径が2m くらいからせいぜい7m 程度までと考えられている。つまり、小惑星の内部物質を採取する場合には、探査機を正確に誘導できなければならない。ここが大きな課題となる。

この他にもいくつか検討はなされたが、最も可能性が高いものとして、搭載型の衝突機を追加するという案が有力になっている。この案に基づくミッションシナリオをまとめてみたものが、図3である。2014年に打ち上げられた「はやぶさ2」は、地球スイングバイを経て2018年に目的地である1999 JU3に到着する。到着後、しばらくは「はやぶさ」と同様な探査を行い、その後、適当なタイミングで衝突機を衝突させる。衝突によって人工クレーターができるが、その様子を観測し、内部物質の採取も試みた後、2019年に地球帰還のため小惑星から出発する。そして、地球帰還は、2020年となる。

ここで搭載型の衝突機であるが、その候補として、EFP

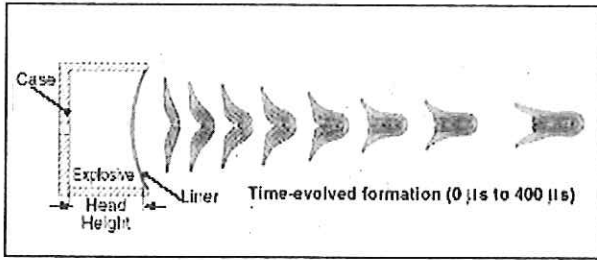


図4 Explosively Formed Projectile (Wikipedia より)

(Explosively Formed Projectile: 爆発形成侵徹体) というものを検討した。これは、箱の中で爆薬が爆発するとそのふたとなっている金属ライナが吹き飛んでいくものであるが、金属ライナは変形しながら飛んでいくことになる(図4)。ライナは、非常に短い時間で2~3km/sまで加速される。これによって、小惑星表面に直径が数メートルのクレーターを作ることができるのである。なお、金属ライナは銅やタンタルで作ることにすれば、汚染の問題もかなり防げることになる。

4 探査対象小惑星

すでに述べたように、「はやぶさ2」の探査対象天体は、1999 JU3 というC型の小惑星である。小惑星帯においては、その内側の領域にはS型の小惑星が多く、小惑星帯の中央付近でC型が多くなる。したがって、C型の小惑星は、地球からはより遠いところにあることになり、「はやぶさ」規模の探査機で往復探査ができる軌道にあるものは非常に少ない。現在発見されている小惑星の中では、この1999 JU3 が唯一の候補と言っても過言ではないほどである。1999 JU3 の軌道を図5に示す。

小惑星1999 JU3 については、2007年と2008年に観測キャンペーンが行われ、その物理的な性質がいろいろと分かってきた。まとめてみると、表1のようになる。

表1 小惑星1999 JU3 の物理特性

項目	観測値
自転周期	0.3178 day (~7.6 h)
自転軸の方向	(λ, β) = (331, 20)
軸比	1.3:1.1:1.0
直径	0.922 ± 0.048 km
アルベド	0.063 ± 0.006
絶対等級	18.82 ± 0.021
タイプ	Cg

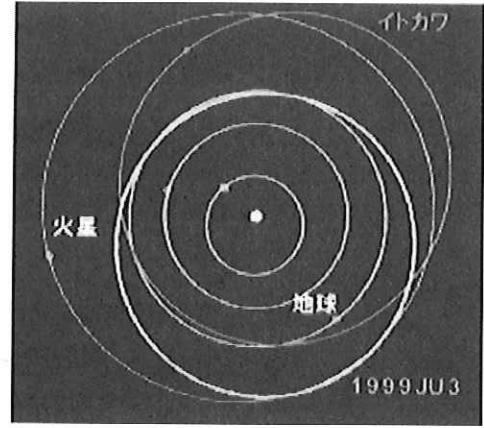


図5 1999 JU3 の軌道

自転周期や天体の大きさなど表1に示されている値であれば、「はやぶさ」と同様な探査機でのサンプルリターンが可能である。ただし、自転軸の方向が黄道面に対してかなり傾いている可能性があり、その場合には、少し工夫が必要となる。

5 まとめ

「はやぶさ2」ミッションによって、C型の微小小惑星の探査ができれば、太陽系の科学に大きな進展をもたらすことは確実である。特に、「はやぶさ」で行ったミッションに衝突機を加えることで、小惑星の物質についてより深く知ることができる。また、スペースガードの立場からすれば、単独の衝突機による衝突ならば、まさに小惑星の地球衝突回避の実験ともなったわけであるが、小型の衝突機であっても、C型の地球接近小惑星の素性は知ることができることは重要である。つまり、そのような天体が地球に衝突する場合の回避方法を検討する上で、重要な手がかりを与えるものとなるからだ。「はやぶさ2」ミッションが早期に実現できることを希望したい。

(2010年2月14日受付, 2010年2月15日受理)



## 小惑星自動検出アルゴリズムの構築

坂本 強<sup>1)</sup> ・ 西山 広太<sup>1)</sup> ・ 奥村 真一郎<sup>1)</sup> ・ 浦川聖太郎<sup>1)</sup> ・ 浅見敦夫<sup>1)</sup> ・ 橋本就安<sup>1)</sup> ・  
高橋典嗣<sup>1,2,3)</sup> ・ 吉川真<sup>1,4)</sup>

<sup>1)</sup> 日本スペースガード協会<sup>2)</sup> 明星大学<sup>3)</sup> 千葉大学<sup>4)</sup> JAXA

### Automatically asteroid-detection algorithm

T. Sakamoto<sup>1)</sup> ・ K. Nishiyama<sup>1)</sup> ・ S. Okumura ・ S. Urakawa ・ A. Asami<sup>1)</sup> ・ N. Hashimoto<sup>1)</sup> ・  
N. Takahashi<sup>1,2,3)</sup> ・ M. Yoshikawa<sup>1,4)</sup>

### Abstract

The present file has been made as a print sample of the camera-ready manuscripts for the Spaceguard meeting. Its text or describes instruction to prepare the manuscripts; layout; the font styles and sizes; and others. If you replace the text or the figures of the present file by your own ones, using Cut and Paste procedures, you can easily make your own manuscripts.

This English Abstract has narrower width than the main text by 10mm for the left and the right margins of the main text, respectively. Font size used here is 10pt. the length may be less than 150 words.

Key Words: asteroid detection method

#### 1 Introduction

Advent of mosaic CCD cameras have recently provided wide-field surveys by 1-m class telescope for Near Earth Asteroids (hereafter NEAs) that have a semi-major axis less than 1.3 AU, such as Catalina Sky Survey (Larson et al. 1998, 2003), Lincoln Near-Earth Asteroid Research (Stokes & Kostishack 1997), Spacewatch (Perry et al. 1996). These surveys obtained about 10 GB or larger volume of data per day and discovered about one thousand NEAs per year.

Asteroids have typical daily motions of 15 arcminutes or larger across the sky, and undertaking followup observations soon after their detection is important for determination of their orbital properties. In particular, the NEAs move a few degrees per day and often become fainter because they go away from the Earth. Thus, determination of the orbits of the NEAs requires us for completing data processing of a large volume of images within several hours and starting follow observations all over the world.

Previous works constructed the algorithms of detecting very faint main-belt asteroids automatically by utilizing the matched filter or by combining multiple frames along the

typical motion of main-belt asteroids (Gural et al. 2005; Yanagisawa et al. 2005).

For several years, fully-depleted CCDs and computer processors have great improvements. First, the fully-depleted CCDs have advantage of high quantum efficiency up to  $\sim 9000\%$ , and highlight on observation at longer wavelength that asteroids are brighter.

However, the fully-depleted CCDs are sensitive to the cosmic-ray events and produce many cosmic rays of various shapes and sizes. The cosmic-rays are found to occupy  $\sim 0.2-0.7\%$  of the whole image of the fully-depleted CCDs from our investigation, and these robust identification and removal in a single frame are very important. Second, multi-core PCs have become widely used, and appropriate parallel processing plays roles in fast detection of asteroids from large volume of data. In particular, previous works mainly focused on detection of main-belt asteroids, and construction of the fast detection algorithm for the asteroids that moved in various directions and quantities is vital.

Motivated above, we constructed a new algorithm that quickly detects the asteroids with

various motions from the imaging data provided by fully-depleted CCDs. We describe the new algorithm in detailed in Section 2, and apply the algorithm for some imaging data in Section 3.

## 2 Method

The algorithms to reduce the cosmic-ray events from a single frame were constructed (Rhoads 2000; van Dokkum 2001; Pych 2004). Farage & Pimblet (2005) performed a benchmark test by applying the algorithm for artificial images having various cosmic ray events. They found that the method of van Dokkum have the highest performance in various factors, such as the fraction of detected cosmic-ray pixels and spurious pixels, and thus we first remove cosmic-ray events by using the method. However, some elongated events could not be removed completely; in many cases they are resolved into a lot of sources concentrated much more centrally than stars. We thus remove such compact sources by utilizing the parameters in sextractor software (Bertin & Arnouts 1996), i. e., the value at the peak of the source relative to the totally integrated value (Robin et al. 2007) and the number of the pixels having values larger than the threshold.

We summarize the procedure of the asteroid detection below.

- We remove cosmic-ray events by using the method of van Dokkum (2001), Robin et al. (2007), and the number of the pixels having values larger than the background (typically 9 pixels).
- We determinate the parameters of World Coordinates System (WCS) with high precision by fitting the 3rd or 5th polynomial for distortion correction We adopt the USNO-SA2.0 for astrometric catalogs.
- We detect the astronomical objects with sextractor software by applying convolution. For detection of the faint asteroids, the threshold of the objects is  $1\sigma$  above background.
- We remove known stars and galaxies by using the USNO-B catalog (Monet et al. 2003) and the Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey (Abazajian et al. 2009).
- We divide into some subimages with overlap regions and search for moving objects with 0-C

residual less than  $1.5''$ . The area of subimages is provided by the maximum quantities of the motion of the target asteroids, i. e., (the maximum daily motion of the asteroid)  $\times$  (the observation duration between first and latest frames).

We perform parallel processing for determination of the WCS parameters, removal of the stars and galaxies, and search for moving objects.

## 3 Results

We apply the new algorithm for real imaging data. The 2KCCD camera mounted on 1-m Schmidt telescope at Kiso observatory covers  $50' \times 50'$  with pixel scale of  $1.5''$ . Unfortunately, the camera do not use fully-depleted CCD chip, and the cosmic-ray events occupies only 0.04 % of the image. We obtain a set of 9 imaging data at about 1 hour west of the opposition on 13 October, 2004 by using Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive System (Baba et al. 2002). The exposure time of the data is 240 sec and the observation duration is about 50 minutes. We use Intel (R) Xeon (R) 2 QuadCore X5470 3.33 GHz processor for the detection of the asteroid.

Table 1 shows the number of the asteroids that are detected by our algorithm and eyes, as a function of the magnitude predicted from the orbital parameters provided by the Minor Planet Center. The detection denotes the fraction of the asteroids detected with the 0-C residual less than  $1.5''$  by our algorithm for the asteroid confirmed by naked eyes. We confirmed 11 main-belt asteroids and 1 comet by naked eyes in the fields. Our algorithm does not detect 3 main-belt asteroids. One of them moves around the stars during observation, whereas the remaining two asteroids have relatively low S/N,  $S/N \sim 7$ . The former asteroid is detected as astronomical objects, but their 0-C residuals are  $\sim 2''$ . The latter asteroids are not detected as astronomical objects.

For this detection, it takes about 10 minutes. Most of the time It consists of 5 minutes for removal of cosmic-ray events, 40 sec for determination of the WCS parameters, 1 minute for removal of star and galaxies, 2 minutes for search of the moving objects, and 20 sec for others.

#### 4 Summary

We constructed a new fast algorithm for asteroids with various motions, which is applicable for the images of fully-depleted CCDs. The algorithm is optimized for currently widely used multi-core PCs.

#### 参考文献

- 1) Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agueros, M. A., et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- 2) Baba, H., et al. 2002, *ADASS XI*, eds. D. A. Bohlender, D. Durand, & T. H. Handley, *ASP Conference Series*, 281, 298
- 3) Bertin, E., & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- 4) Farago, G. L., & Pimblet, K. A. 2005, *PASA*, 22, 249
- 5) Gural, P. S., Larsen, J. A., & Gleason, A. E. 2005, *AJ*, 130, 1951
- 6) Larson, S., Brownlee, J., Hergenrother, C., & Spahr, T. 1998, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 30, 1037
- 7) Larson, S., Beshore, E., Hill, R., Christensen, E., McLean, D., Kolar, & S., McNaught, R., Garradd, G. 2003, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 35, 982
- 8) Monet, D. G., Levine, S. E., Canzian, B., et al. 2003, *AJ*, 125, 984
- 9) Perry, M. L., McMillan, R. S., Barr, L. D., Bressi, T. H., & Gehrels, T. 1996, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 28, 1096
- 10) Pych, W. 2004, *PASP*, 116, 148
- 11) Rhoads, J. E. 2000, *PASP*, 22, 1
- 12) Robin, A. C., Rich, R. M., Aussel, H., et al. 2007, *ApJS*, 172, 545
- 13) Stokes, G. H. & Kostishack, D. F. 1997, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 822, 544
- 14) van Dokkum, P. G. 2001, *PASP*, 113, 1420
- 15) Yanagisawa, T., Nakajima, A., Kadota, K., Kurosaki, H., Nakamura, T., Yoshida, F., Dermawan, B., & Sato, Y. 2005, *PASJ*, 57, 399

(2010年1月27日受付, 2010年2月14日受理)

## 小惑星軌道解析システムの開発

山口 智宏<sup>1)</sup>、坂本強<sup>2)</sup>、黒田大介<sup>3)</sup>、伊藤孝士<sup>3)</sup>、吉川 真<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 総合研究大学院大学, <sup>2)</sup> 日本スペースガード協会, <sup>3)</sup> 国立天文台, <sup>4)</sup> ISAS/JAXA

Development of Trajectory Analysis System for Asteroids

Tomohiro YAMAGUCHI<sup>1)</sup>, Tsuyoshi SAKAMOTO<sup>2)</sup>, Daisuke KURODA<sup>3)</sup>,  
Takashi ITO<sup>3)</sup>, Makoto YOSHIKAWA<sup>4)</sup>

### Abstract

The trajectories of the asteroids are important not only for the scientific motivation, but also for monitoring the Potentially Hazardous Asteroids (PHAs). A lot of observatories make efforts for searching and tracking PHAs, and have discovered some dangerous asteroids, like 99942 Apophis (2004 MN4) etc. The accurate trajectory is estimated by orbit determination method using optical and radar observation. Since the close approaches of PHAs are quite sensitive problem, comparing the result with several analyses are important. In this paper, the development of trajectory analysis system for asteroids are introduced. Especially, the prediction method of impact probability for PHAs is investigated. The analysis for close approaches of Apophis and 2008TC3 are described as an example.

Key Words: Near Earth Object, Impact probability, Orbit estimation

### 1 緒論

小惑星は地球や火星などの大型天体のように熱変成や地殻変動を受けていない可能性が高く、太陽系創生時の組成をそのまま保っていると考えられている。その中でも地球近傍小惑星は宇宙機で直接探査するために必要なエネルギーが比較的小さいため、これまでにも小惑星探査機はやぶさなど数多くの探査がなされてきた<sup>1)</sup>。

しかしながら、そのような小惑星の中には地球に接近し、衝突する可能性のあるものも存在する。これまでも月軌道よりも内側に接近した小惑星があったことも分かっている<sup>2)</sup>。

そのような小惑星は常に警戒し観測し、その軌道を監視する必要がある。NASAでは“Spaceguard”と呼ばれる地球近傍小惑星の観測プログラムが行われている。このプログラムでは直径1 km以上の地球近傍小惑星の90%を発見することを目標としている。今後はさらに小さい小惑星を発見するために、PanSTARRS4やLSSTなどの計画が進行中である<sup>3)</sup>。このようなプログラムで発

見された小惑星は、観測データから軌道が計算され、地球などの天体との衝突確率が求められる。これまでにも1997XF11や1999AN10などが地球に接近する小惑星として計算されている<sup>2, 4)</sup>。

そのような軌道解析システムは主にNASA/JPL、やピサ大学などで盛んに行われている。日本では、美星スペースガードセンターなど数多くの施設で、小惑星の発見・観測を行っているにも関わらず、独自の軌道解析システムを保持していない。そのようなシステムを構築することができれば、よりデータ処理が迅速になり、より効率的な観測が可能になると考えられる。

本発表では、小惑星軌道解析システムに関して、特に軌道解析に関して述べる。具体的には、小惑星の観測データから衝突確率を計算する手法を説明していく。また具体例として、2029年に地球に接近する小惑星99942 Apophisと2008年10月に地球に衝突した小惑星2008 TC3に関する軌道解析を紹介する。

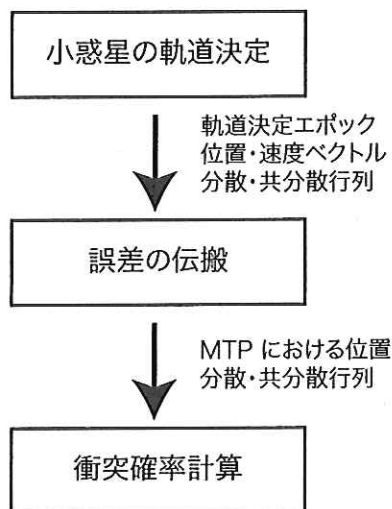


Fig. 1 小惑星衝突確率計算の流れ

## 2 小惑星の衝突確率計算

小惑星の天体衝突確率計算は以下の3つのステップからなる。

1. 小惑星の軌道決定
2. 決定誤差の伝搬
3. 衝突確率の計算

その計算の流れを Fig. 1 に示す。

### 2.1 小惑星の軌道決定

衝突確率計算をするためには、まず小惑星の軌道を決定する必要がある。小惑星の軌道決定には重み付き最小二乗法を用いた、推定パラメータ  $X$  はある時刻  $t_0$  における位置・速度ベクトルである。観測量は光学観測による赤経  $\alpha$ ・赤緯  $\delta$ 、レーダー観測によるレンジ・ドップラーである。観測値と計算値の残差を  $\rho = \rho(X)$  とおき、観測数を  $m$  とすると、軌道決定は次式の評価関数  $Q$  を最小化する問題となる。

$$Q = \frac{1}{m} \rho^T W \rho \quad (1)$$

$W$  は重み行列であり、観測精度  $\sigma_w$  を反映している。

本研究において小惑星の軌道伝搬は次式を用いた。

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{\mu_s}{r^3} \mathbf{r} + \sum_{k=1}^n \mu_k \left( \frac{\mathbf{r}_k - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{r}_k}{r_k^3} \right) + \Delta \quad (2)$$

$\mathbf{r}$  は太陽中心の位置ベクトル、 $\mu$  は重力定数、 $n$  は考慮する摂動天体の数を示している。 $\Delta$  は太陽の一般相対論による加速度を表している。本研究では摂動天体として、8 惑星、冥王星と 3 大小惑星 (Ceres, Pallas, Vesta) を考慮した。太陽、8 惑星、冥王星、月の天体暦は JPL Ephemeris DE405 を使い、小惑星の天体暦は JPL Horizons が提供している値を補間した。

これらから、軌道決定エポック  $t_0$ 、そのときの位置・速度ベクトル  $X^*$ 、それに対する分散・共分散行列  $C_X$  が求められる。

### 2.2 誤差の伝搬

ここでは、軌道決定によって求められた分散・共分散行列  $C_X$  を MTP (Modified Target Plane) における分散・共分散行列  $C_{CA}$  に伝搬させることを説明する。以後下付き文字  $CA$  は小惑星の天体最接近時刻を示す。

天体接近時刻  $t_{CA}$  は軌道決定から得られた軌道決定値  $X_0$  を軌道伝搬させ、対象天体との距離を監視して求める。

小惑星が天体に接近した場合には MTP (Modified Target Plane) 座標系を用いる。MTP 座標系 ( $S_{MTP}, T_{MTP}, R_{MTP}$ ) は  $S_{MTP}$  軸が小惑星の最接近時の天体相対速度ベクトル  $V_{CA}$  方向、 $T_{MTP}$  軸が赤道面と平行かつ  $S_{MTP}$  軸と垂直に交わる天体中心直交座標系である。一般的に用いられる B-plane 座標系とは基準となる速度ベクトルが異なる (Fig. 2)。

MTP 座標系における分散・共分散行列  $C_{CA}$  は遷移行列  $\Phi (= \partial X_{CA} / \partial X^*)$  と慣性系から MTP 座標系への回転行列  $R$  を用いて次式で

$$C_{CA} = (R\Phi) C_X (R\Phi)^T \quad (3)$$

遷移行列  $\Phi$  は変分方程式を用いて、軌道とともに数値計算される。

### 2.3 衝突確率計算

衝突確率計算は MTP ( $R_{MTP} T_{MTP}$  面) に投影された誤差楕円が天体に重なる部分を積分して求められる。



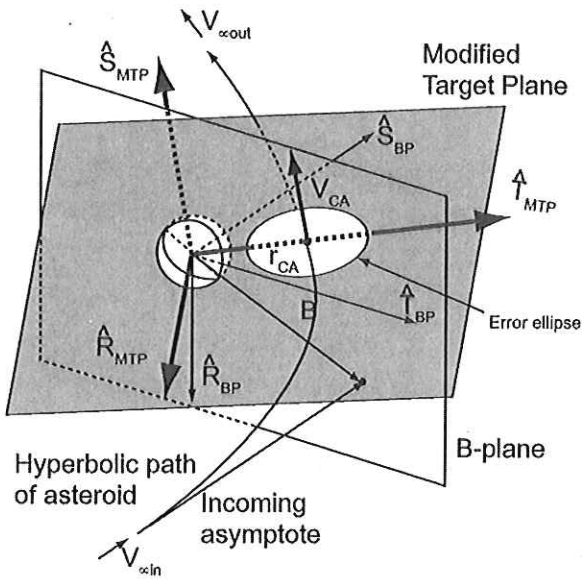


Fig. 2 B-plane と MTP 座標系

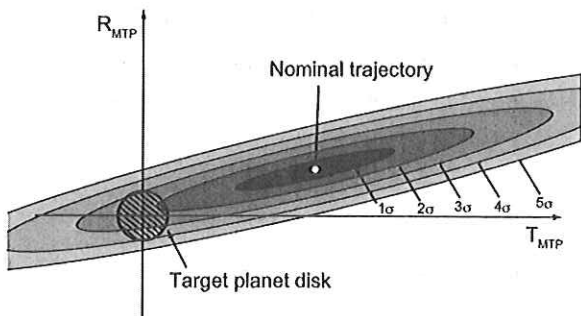


Fig. 3 2次元正規分布と積分領域

MTP 座標系におけるノミナル値  $X^*$  からのずれを  $\Delta X$  とする。  $\Delta X$  が十分に小さい場合、誤差楕円体は MTP 座標系における分散・共分散行列  $C_{CA}$  を用いて次式で表される<sup>5)</sup>。

$$(\Delta X)^T C_{CA}^{-1} (\Delta X) \leq \sigma^2 \quad (4)$$

$\sigma$  は考慮する誤差の大きさを示す。

このように計算された誤差楕円体を MTP に投影し、Fig. 3 のような 2 次元確率密度関数を求める。そして、確率密度関数と天体に対応する円の領域分を積分し衝突確率とする。2 次元確率密度関数と円が重なる領域の計算には Michel のアルゴリズム<sup>6)</sup> を用いた。

Table 1 小惑星 Apophis の軌道決定値 (2008/01/09)

	Value	Uncertainty ( $1\sigma$ )
$a$ AU	0.92227942047386	1.81732060369818e-08
$e$	0.19108999052203	6.47122581352282e-08
$i$ deg	3.33133956968007	1.65101167930690e-06
$\Omega$ deg	204.456926239662	7.56680683027179e-05
$\omega$ deg	126.391669170777	7.53698300836189e-05
$M$ deg	253.006675342956	3.20902347627226e-05

### 3 軌道解析の具体例

#### 3.1 小惑星 Apophis

ここでは小惑星 99942 Apophis を例として地球衝突確率を計算する。Apophis は 2004 年 6 月に初めて観測された直径約 270 m の天体である。これまでに数多くの観測がなされ、2029 年 4 月 13 日に地球中心から約 38,000km を通過する予測されている。この天体は 2036 年に再び地球に接近することが分かっており、注目を集めている。

この天体の光学観測は 2004 年 2 月から 2008 年 1 月までの約 3.8 年行われている。この間に 5 回のレーダー観測が成功しており<sup>7)</sup>、それらを用いて軌道決定を行い、その軌道決定値を Table 1 に示す。  $a$  は軌道長半径、  $e$  は離心率、  $i$  は軌道傾斜角、  $\Omega$  は昇交点経度、  $\omega$  は近点引数、  $M$  は平均近点離角を示す。 Table 1 に示す決定誤差は観測精度  $\sigma_w$  を 1.0 arcseconds ( $1\sigma$ ) とした値である。

この軌道決定値を用いて、小惑星 Apophis の地球衝突確率を計算する。軌道決定によって求められた分散・共分散行列を最接近時刻  $t_{CA}$  まで伝搬させ、MTP 上の誤差楕円を求める。 Fig. 5 に 2029 年地球接近における  $3\sigma$  の誤差楕円を示す。そして、2029 年の地球接近に関する計算結果を Table 2 にまとめる。ここで、ノミナル接近距離は軌道決定値を最接近時刻  $t_{CA}$  まで伝搬したときの地球中心からの距離を示し、最悪接近距離は  $3\sigma$  の誤差楕円まで考慮した最小距離を示す。  $3\sigma$  まで考慮しても 30,000 km より近づくことは無く、2029 年地球

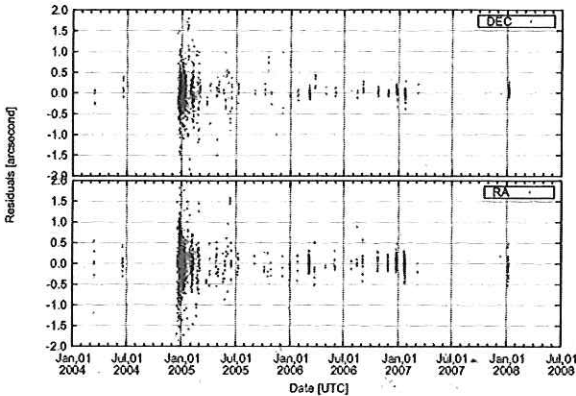


Fig. 4 小惑星 Apophis の残差

Table 2 Apophis 2029 Earth encounter

最接近時刻 (TDB)	2029/04/13- 21:45:36.859
ノミナル接近距離 (km)	37794.18
相対速度 (km/s)	7.430686
衝突確率 (%)	0.000

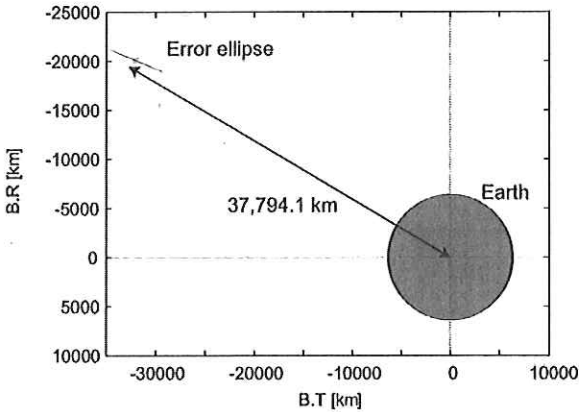


Fig. 5 Apophis 2029 年地球接近における誤差楕円 ( $3\sigma$ )

接近における衝突確率は0であることが分かる。

### 3.1.1 誤差楕円が成り立たない場合

軌道決定誤差が大きい場合、式 (4) の  $\Delta X$  が大きくなってしまい、誤差領域を楕円体と近似することが出来なくなる。その例として小惑星 Apophis の 2036 年地球接近について計算する。2036 年の Apophis の軌道誤差は 2029 年の地球接近のために非常に大きくなる。共

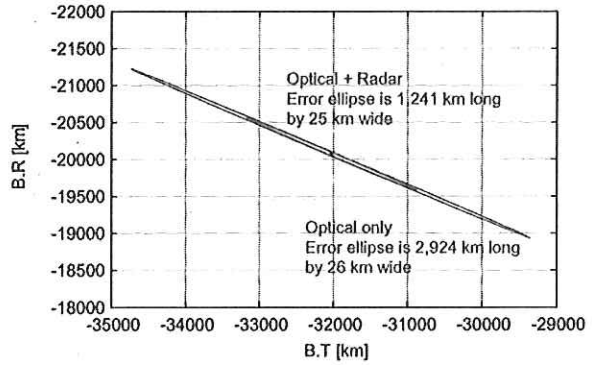


Fig. 6 Apophis 2029 年地球接近における誤差楕円 (拡大図) ( $3\sigma$ )

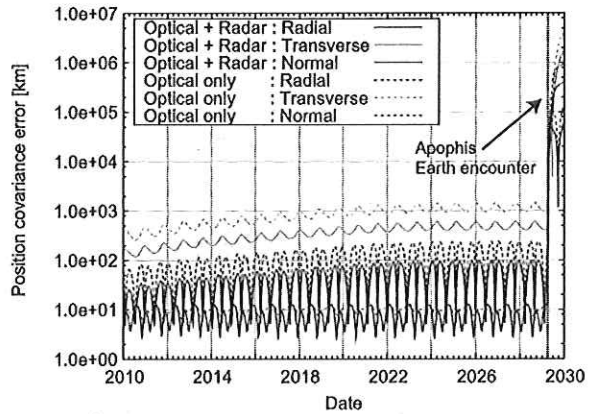


Fig. 7 小惑星 Apophis の軌道予報誤差

分散解析により、誤差を伝搬し、2010 年から 2030 年までの位置予報誤差を計算した。Fig. 7 には位置予報誤差を動径方向  $R$ 、軌道面垂直方向  $N$ 、それらに直行する方向  $T = N \times R$  の成分として表している。また、実線は光学観測とレーダー観測の両方を用いた軌道決定解、鎖線は光学観測のみを用いた軌道決定解の共分散を伝搬している。全体を通じて軌道面内の誤差が大きく、特に Transverse 方向の誤差が大きいことが分かる。また、レーダー観測は光学観測に比べ、観測数が非常に少ないにも関わらず精度向上に寄与していることが見て取れる。どちらのケースにしても 2029 年の地球接近を境に誤差が急激に拡大しており、誤差を線形近似することが不可能であることが分かる。そのことをより明らかにするために、2036 年地球接近における Apophis の位置

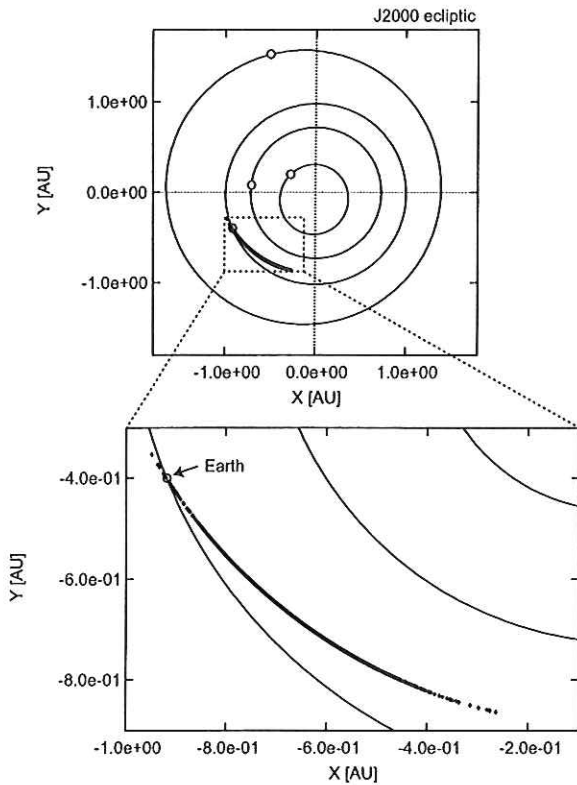


Fig. 8 Apophis の地球接近 (2036 年)

に関するモンテ・カルロシミュレーションを行った。2036 年の最接近時刻を 4 月 13.375 日 (UTC) としたモンテ・カルロシミュレーションの結果を Fig. 8 に示す。サンプリング数は 1500 点である。誤差が大きいと Fig. 8 のように湾曲した誤差領域となり、楕円に近似することが出来ないことが分かる。

### 3.2 小惑星 2008TC3

小惑星 2008TC3 は 2008 年 10 月 6 日に発見され、その数時間後に地球に衝突した。大きさは 2-3 m と推測されている。このようなサイズの小惑星は数ヶ月に 1 度の頻度で地球に衝突しているが、予め衝突することが予測できたことは初めてであった。発見されてから地球衝突まで約 20 時間しか無かったが、500 点以上の光学観測がなされており、非常に注目された天体であったことが分かる。2008TC3 はアポロ型の軌道をとる小惑星で、周期は約 1.5 年である。ここでは、観測数による誤差楕円の違いを明らかにするために、2008TC3 の観測において、

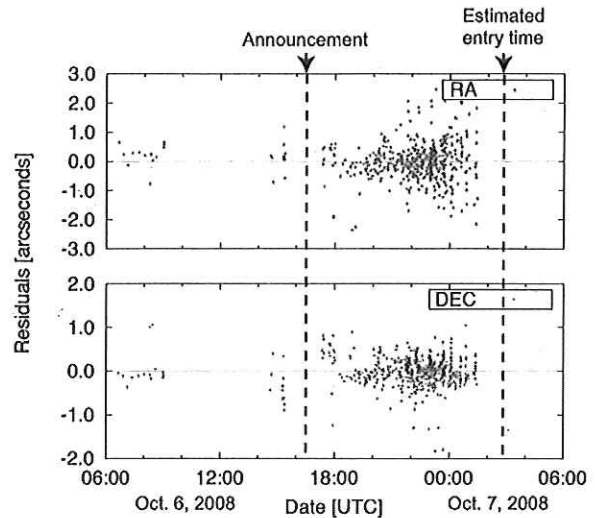


Fig. 9 小惑星 2008TC3 の残差

(1) 地球衝突がアナウンスされる前までのデータ, (2) 地球衝突までのすべてのデータ, の 2 ケースを計算し比較する。ケース 1 における観測数は 26 であり、ケース 2 における観測数は 531 であり、その光学観測の残差を Fig. 9 に示す。地球衝突のアナウンス後に観測数が急激に増加していることが分かる。軌道決定解は両ケースともにほぼ同じであるが、その軌道誤差は大きく異なる。2 つのケースの軌道誤差を比較するために、Fig. 10 にそれぞれのケースにおける地球突入時の誤差楕円を前述の MTP 座標系で表す。ケース 2 の誤差楕円はケース 1 の誤差楕円と比べ、1/40 の大きさになっており、予測精度が観測数に応じて良くなっていることが分かる。

2008TC3 の地球衝突に至る軌道を地球-太陽方向固定の回転座標系で Fig. 11 に示す。ここから分かるようにこの小惑星は夜側から地球に接近しており、そのため衝突直前までの観測が可能であった。この接近軌道の直下履歴を Fig. 12 に示す。地球の自転により、直下点は東から西へ移動し、最終的にはスーダン上空で大気圏に突入していることが見て取れる。大気圏突入時の地表面に沿った誤差楕円は長半径が 7 km 程度の大きさとなる。Fig. 13 には地表面に沿った  $3\sigma$  の誤差楕円とモンテカルロシミュレーションの結果を重ねて示している。モンテカルロシミュレーションの点はほぼすべてが誤差楕円内に収まっており、計算が正しく行われていることが検

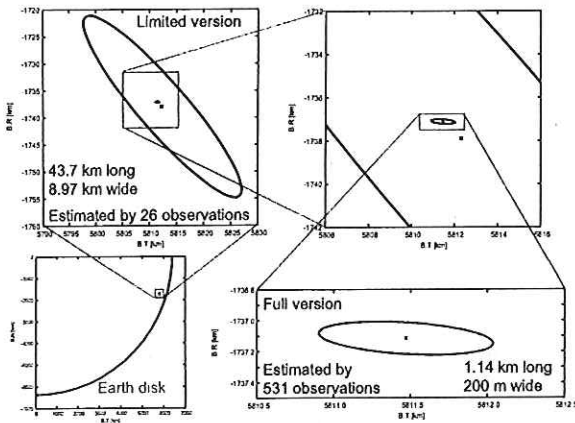


Fig. 10 小惑星 2008TC3 の地球突入時の誤差楕円

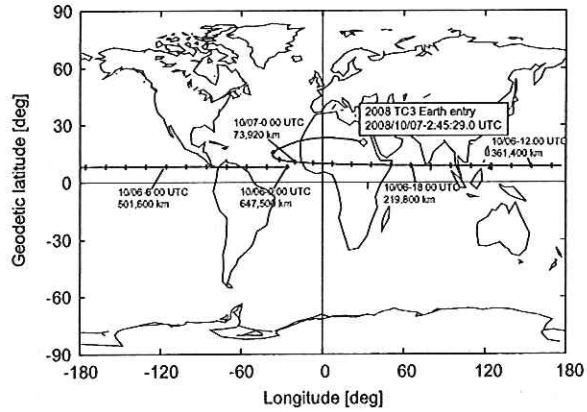


Fig. 12 小惑星 2008TC3 の直下点履歴

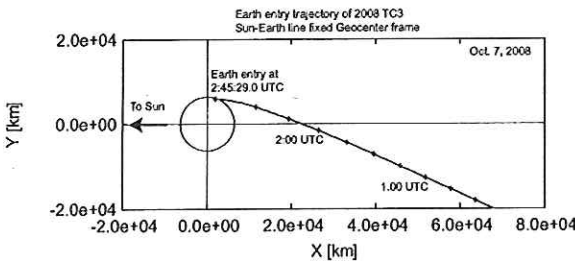


Fig. 11 小惑星 2008TC3 の地球衝突軌道 (地球-太陽方向固定)

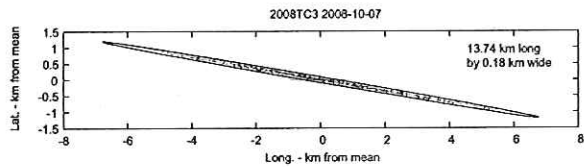


Fig. 13 小惑星 2008TC3 の地球表面に沿った誤差楕円

証されている。

#### 4 結論

本発表では、小惑星軌道解析システムの開発について、特に軌道計算の詳細と検証結果について説明した。具体例として、2029年に地球接近する小惑星 Apophis と 2008年10月に地球に衝突した小惑星 2008TC3 に関する軌道解析を行い、その結果の正当性を確認した。

小惑星 Apophis の解析ではレーダー観測の有効性を、小惑星 2008TC3 の解析では観測数と軌道予報精度の関係を定量的に評価した。

今後は実際にこのシステムを運用し、そこから発生するであろう不具合に対処していく予定である。

#### 参考文献

1) Kawaguchi, J., Fujiwara, A. and Uesugi, T., *Hayabusa - Its technology and science accom-*

*plishment summary and Hayabusa-2*, Acta Astronautica, vol.62, 639-647., 2008.

- 2) Chodas, P. W. and Yeomans, D. K., *Orbit determination and estimation of impact probability for Near Earth Objects*, AAS 99-002, 1999.
- 3) NASA, *Near-earth object survey and deflection: analysis of alternatives. Report to Congress*, 2007
- 4) Milani, A., Chesley, S. R. and Valsecchi, G. B., *Close approaches of asteroid 1999 AN10: resonant and non-resonant returns*, A&A, 1999.
- 5) Byron D. T., Bob E. S. and George H. B., *Statistical Orbit Determination*, Academic Pr., 2003.
- 6) Michel, J.R., *A New Method for Accurately Calculating the Integral of the Bivariate Gaussian Distribution over an Offset Circle*, JPL Eng. Memo. 312/77-34, 1977.
- 7) Giorgini, J. D., Benner, L. A. M., Ostro, S. J., Nolan, M. C. and Busch, M. W., *Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis, Icarus*, 2008.

(2009年12月21日受付, 2010年1月15日受理)

# 小口径望遠鏡による小惑星サーベイ観測

黒崎裕久・柳沢俊史

JAXA

## Minor planet survey observation by small telescope

Hirohisa KUROSAKI, Toshifumi YANAGISAWA

### Abstract

Recently, the discovery of the minor planet with the large telescope stands out. But, the minor planet can be discovered with the small telescope. It is possible by image analysis. Actually, we have discovered a lot of minor planets by the image analysis. A small telescope of the aperture 35cm enabled the discovery of the faint minor planet of 22-magnitude by using the moving object detection software. As a result, the minor planets of the main belt are discovered, many new designations have been acquired. Moreover, the method to observe a minor planet in a small telescope effectively is studied.

Key Words: Minor Planet, Optical Observation, Telescope, CCD Camera, Detection

#### 1 はじめに

近年、地球に衝突する可能性のある天体を早期に発見するために、世界規模で大型望遠鏡を用いたサーベイ観測が行われ明るい小惑星はほとんどが発見された。これによりアマチュア天文家による小惑星発見は劇的に減少してしまった。しかし、発見数では敵わないものの、世界的に見て小口径望遠鏡（ここでは、口径数十cmクラスを示す）でもまだまだ未知小惑星が発見されている。MPC<sup>1)</sup>によれば2009年12月現在の仮符号は47万個を超え、軌道が求まり番号登録されたものは22万8千個である。今後、Pan-STARRSが本格的に稼働すれば、これらの数字は劇的に増えると予想されている。

#### 2 小口径望遠鏡による小惑星探索

世界における小惑星の仮符号取得について、発見等級を見てみると、図1に示したように暗い方へシフトしていることがわかる。1990年には17等台が最も多かったが、2000年には18~19等級、2008年では20等級後半が多くなっている。観測に用いる望遠鏡の口径についてみると、以外にも小口径望遠鏡での取得が結構みられる。図2にMPC<sup>1)</sup>公表による2009年11月の新月期間に発見され仮符号を取得した小惑星の口径別の発見数を示す。このように20cmクラスから始まり、40cmクラスでの発見も多数ある。どのような手法を用いて発見しているかは、今のところ不明であるが、小口径望遠鏡でも、まだまだ小惑星を発見することが可能である。（ただし、MPC記載の観測に使用した機器情報は正し

いものとする。)

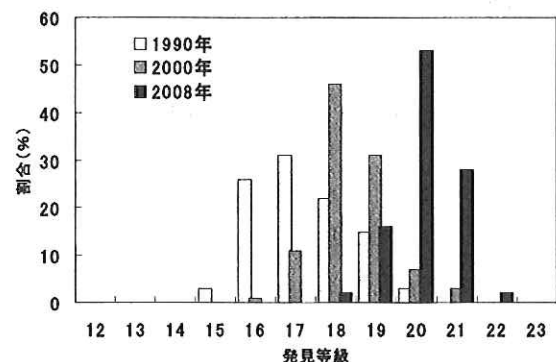


図1 世界での小惑星発見等級の推移

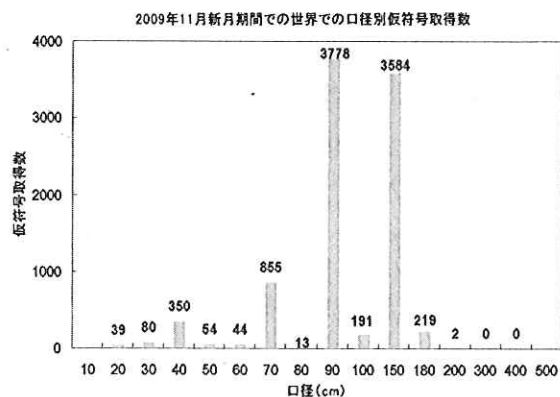


図2 2009年11月新月期間の世界での口径別仮符号取得数 (90cmと150cmについては691とG96の連携によりダブっている可能性あり)



## 小型望遠鏡による小惑星サーベイ

### 3 JAXAでの小惑星発見と移動天体検出ソフト

小口径望遠鏡での限界等級を考えれば、従来のようにブリンクで小惑星を探検して発見することは難しくなっており、画像解析により小惑星を発見することは賢明であると思える。JAXAで開発した移動天体検出アルゴリズム<sup>2)</sup>は、同じ領域を40枚撮り続けた場合、およそ2倍の口径に匹敵する暗い小惑星を検出することができる。

JAXAではこれまでに35cm小口径望遠鏡と探索ソフトを用いて、2009年12月現在350個の小惑星を発見してきた。暗いものでは22等級を超えるものもあり、そのほとんどが1枚の画像からは検出困難となっている。

このソフトは取得した画像の前処理から、移動天体の探索、確認、位置測定、発見報告作成までの一連の作業を1本のソフトでできるようになっている。

### 4 マイダナク天文台での試験観測

#### 4.1 マイダナク天文台

マイダナク天文台 (Maidanak Observatory : 66°56' E, 38°41' N) は、中央アジアのウズベキスタン南東部の山間部にあり、サマルカンドの南方に位置する(図3)。

この天文台は、1970年にウズベキスタン科学アカデミー ウルグベク天文研究所がマイダナク山頂(標高2593m)に開設した。晴天率は年間220日程度、平均シーイングはハワイ島マウナケア山頂にも匹敵すると言われ、一年を通じて観測不能な時期が無い。しかし、ソビエト連邦崩壊後は資金不足のために望遠鏡の整備がほとんど行われていないのが現状である。

2009年11月15日にマイダナク天文台を訪れたときは、星が針のように鋭く、天の川の精細さがよくわかり、すばる(プレアデス星団)を肉眼でも幾つも容易に分解できた。あまりの星の多さに、星座が分からなくなるほどで、マウナケア山頂で感動した星空を思い出すほどだった。

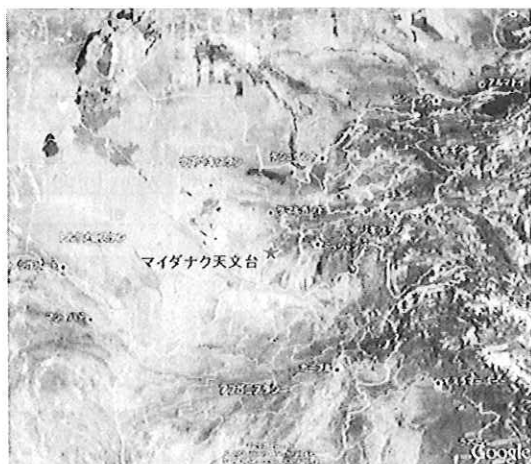


図3 マイダナク天文台の位置

マイダナク天文台でもっとも大きな望遠鏡は、Ritchey-Chretienの口径1.5m (F7.75)であり、4K4K裏面照射CCDカメラが取り付けられている。そのほかにも天文台敷地内に点々と設置されたドームやスライディングルーフの中に、口径1mが1基、60cmが2基、40cmが1基などがある。いずれも視野導入は目盛環を使い手動で行うものがほとんどであり、PCから自動導入できるものは無いようである。

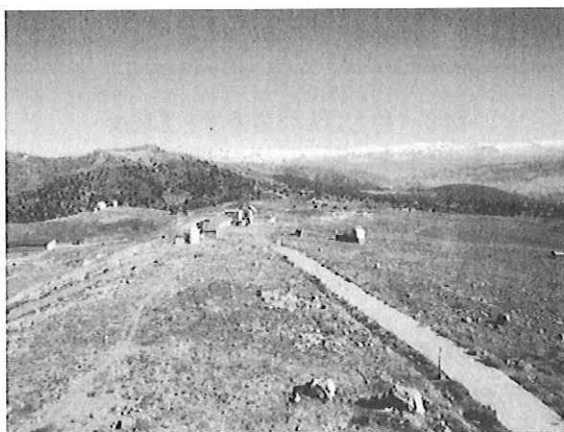


図4 マイダナク天文台の風景

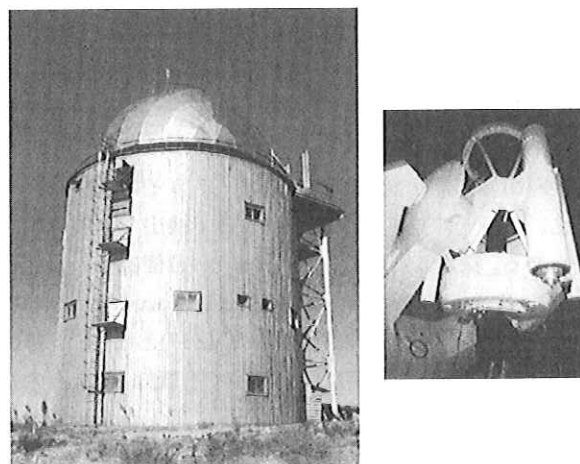


図5 1.5m望遠鏡とドーム外観

#### 4.2 20cm望遠鏡での観測

我々は、マイダナク天文台に小型望遠鏡と小型赤道儀を持ち込み、試験観測を行った。

持参した望遠鏡はセレストロンのシュミットカセグレン口径20cm、赤道儀はビクセンのGPD (SkySensor2000)である。CCDカメラはNILのIK1KCCDカメラである。図6に観測システムの写真を示す。極軸を合わせて設置したが、1分を超える露出では若干の恒星の流れが確認されたので、1枚の画像の露出時間は30秒とした。1領域あたり2時間ほど観測するので240枚の画像を取得したことになる。条件よく観測できたのは2領域である。



図6 持ち込んだ望遠鏡と赤道儀

4.3 探索

観測した画像から小惑星を探索するのに用いるのは、ステラハンター・プロフェッショナルを改良して更に探索精度を上げたJAXA版の移動天体検出ソフトである。観測した画像は枚数が多いため、移動天体検出ソフトで処理するには負荷やメモリ不足になる。そのため、まず30秒露出画像を6枚ずつ恒星で位置合わせを行い加算した。保存時には加算した値を残した。

ステラハンターでの1次探索では赤経、赤緯パラメータで探索した結果、1領域目では既知が6個、未知が2個検出できた。しかし21等を超える既知小惑星は検出できなかった。また動きが速いK01SS6Gは20.9等級だったので、この探索では検出できなかった。元々の30秒露出の画像を直に処理すれば、スカイの上がりを抑え、トレールロスを少なくするので検出できる可能性もある。探索した数日後、未知のうち1個は他の天文台(691: Steward Observatory, Kitt Peak-Spacewatch)からの発見報告が入ったため既知(2009 VZ37)となった。等級は19.2等であった。別の2領域目でも既知が2個と未知が1個検出できたが、後日には同様に報告が入ったため2009 WH27となってしまった。

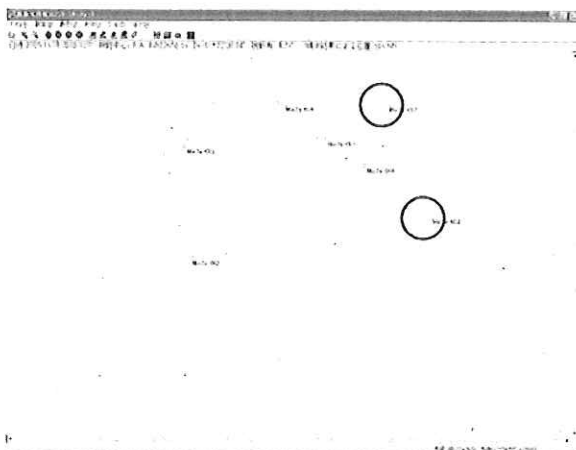


図7 検出できた小惑星 (1領域目)

シュミットカセグレン望遠鏡は、主鏡を動かして調整するため、ピント合わせが難しく、今回は若干甘かったようで、それも検出に影響していると思われる。また、同領域の観測は1夜のみだったので発見報告はできなかった。しかし、このように20cmクラスの小型望遠鏡でも画像解析により未知小惑星の検出が可能であることがわかる。

5 25cm望遠鏡と大型CCDカメラ

5.1 観測システム

小型望遠鏡を用いた観測として、JAXA入笠山光学観測施設での小惑星サーベイ観測の検討を紹介する。

観測施設には、35cm望遠鏡システムと25cm望遠鏡システムが設置されている<sup>3)</sup>。それぞれの仕様は表1と表2に示したとおりである。

表1 35cm望遠鏡システム

Telescope	e-350 (Takahashi Co.,Ltd)
Diameter	350 mm
Focal Length	1,248 mm (F/3.6)
Image circle	70 mm
Mount	SHOWA 25EF Equatorial Fork-Mount (SHOWA Industry Co.,Ltd)
CCD camera	e2v CCD 42-40 Back-illuminated
Pixels	2048×2048
Pixel size	13.5 μm×13.5 μm
Area	27.6 mm×27.6 mm
FOV	1.27 x 1.27 deg. (with 35cm Tele.)
Cooling	Peltier + Water cooling
Shutter	Mechanical

表2 25cm望遠鏡システム

Telescope	BRC-250 (Takahashi Co.,Ltd)
Diameter	250 mm
Focal Length	1,268 mm (F/5.1)
Image circle	100 mm
Mount	SHOWA 25EL Equatorial Fork-Mount (SHOWA Industry Co.,Ltd)
CCD camera	e2v CCD 44-82 Back-illuminated
Pixels	2048×4096 (1 chip)×2
Pixel size	15.0 μm×15.0 μm
Area	30.7 mm×61.4 mm (1 chip)
FOV	2.6 x 2.6 deg. (with 25cm Tele.)
Cooling	Refrigerator
Shutter	Mechanical

特に35cm望遠鏡システムを用いた小惑星探索では、これまでに350個の未知小惑星を発見してきた。

このように小型望遠鏡でも未知小惑星発見を可能にしているのが、移動天体検出ソフトである。

## 小型望遠鏡による小惑星サーベイ

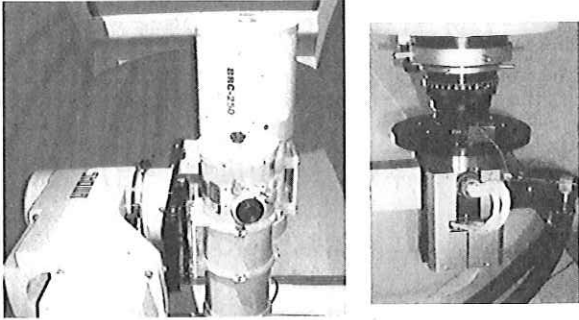


図8 25cm望遠鏡ほかと4K4KCCDカメラ

観測施設の第2ドームに設置してある25cm望遠鏡はベーカー・リッチー・クレチアン方式の高橋製作所製BRC-250である。赤道儀には25cm程度の小型望遠鏡であれば2台まで同架可能である。CCDカメラは英国e2V technologies社の2K4K裏面照射CCD2枚を用いた、モザイク構成のナカニシ・イメージ・ラボ製4K4Kカメラである。このカメラは冷凍機冷却方式を採用しており、冷凍機により冷却された冷媒（ハイドロフルオロエーテル）をカメラまで循環させることでCCDの冷却を行っている。冷媒は-100℃以下まで下がり、CCDの冷却温度は-88℃を達成している。

図8に25cm望遠鏡と赤道儀そして4K4KCCDカメラを示す。

### 5.2 広視野サーベイ

25cm望遠鏡と4K4Kカメラを組み合わせると、2.6deg四方を観測できるが、撮影時に工夫すれば、1晩に効率よい観測が可能になる。

移動天体検出ソフトは同一領域の画像を数十枚必要とする。しかし、1領域を2時間ほどかけて撮影すると1晩に観測できる領域は冬の場合、最大4領域程度である。小惑星は衝付近がもっとも明るく移動量が大きくなるので観測に適している。さらに観測領域の高度が高いほど光害や大気の影響も少ない。そうすると1晩のうちでも良い条件で画像を取得できる領域が限られてくる。例えば4領域を取得した場合、条件がよい画像が撮れるのは半分の2領域程度である。

そこで、画像を1枚撮る毎に視野を替え、また始めの視野に戻るローテーション撮影を行えば、1晩かけて全部の領域を平均的に撮影できる。また小惑星の動きは次の画像までに十分に動いている。これにより5deg四方の領域を観測できる。

観測施設に設置されている赤道儀はこのような動きのスケジュールを組むことが出来る。望遠鏡の導入ズレはほとんど無く、探索時には、それぞれの領域の画像を用いるが、基準恒星での位置合わせをおこなうため特に問題はない。

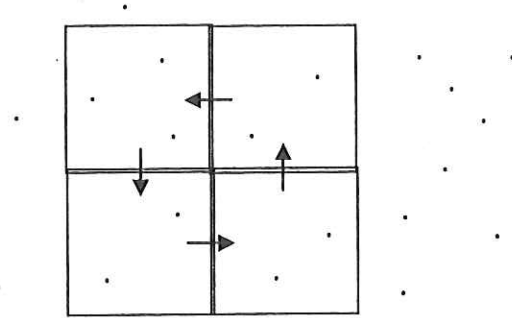


図9 観測例（動かす方向はいろいろ考えられる）

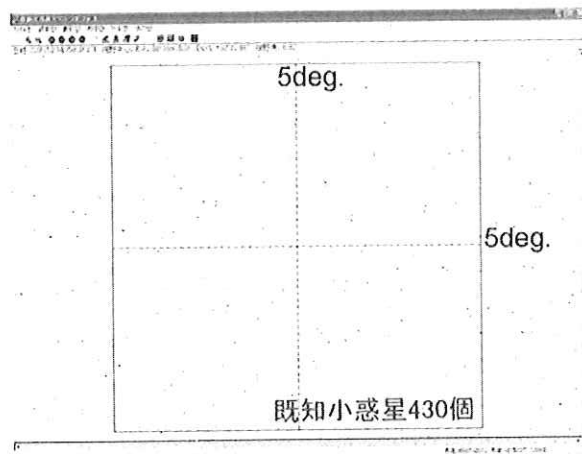


図10 観測視野5deg.四方内の既知小惑星

観測は2009年12月14日におこなったが、あいにく天候状況が悪く、動作試験までとなった。図はそのときの全視野内にある既知小惑星をプロットしたもので、430個ほどの小惑星がある。観測ができれば、これらの小惑星の9割程度は検出でき、さらに数十個以上の未知小惑星が発見できる可能性がある。この試験観測は、この冬季に再観測を行う予定である。

### 6 まとめ

小口径望遠鏡でも小惑星を発見できる可能性がある。Pan-STARRSが本格稼働しない限り、チャンスはあり、効率の良い観測手法や観測システムの考案により広範囲のサーベイもできるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>
- 2) Yanagisawa, T. et al, Automatic Detection Algorithm for Small Movig Objects, PASJ, 57, pp.399-408, 2005.
- 3) H. Kurosaki, et al.: Development of Detection Technology for Space Debris in Nyukasayama Optical Observatory, JSASS, 51st Space Sciences and Technology Conference, 2F16, 2007.

(2010年1月8日受付, 2010年1月15日受理)

## 中小口径望遠鏡で行う惑星科学 -太陽系小天体と系外惑星-

浦川聖太郎<sup>1)</sup>・浜野和弘<sup>2)</sup>・大島修<sup>3)</sup>・奥村真一郎<sup>1)</sup>・坂本強<sup>1)</sup>・西山広太<sup>1)</sup>・吉川真<sup>1,4)</sup>

<sup>1)</sup> 日本スペースガード協会 <sup>2)</sup> 浜野和天文台 <sup>3)</sup> 水島工業高校 <sup>4)</sup> JAXA

### Planetary Science using Small and Medium Sized Telescope -Small Solar System Bodies and Extrasolar Planets-

Seitaro URAKAWA<sup>1)</sup>, Hiromi HAMANOWA<sup>2)</sup>, Osamu OHSHIMA<sup>3)</sup>, Sin-ichiro OKUMURA<sup>1)</sup>,  
Tsuyoshi SAKAMOTO<sup>1)</sup>, Kota NISHIYAMA<sup>1)</sup>, and Makoto YOSHIKAWA<sup>1,4)</sup>

#### Abstract

The light-gathering power of small and medium sized telescopes is less than that of 8m-class telescopes. On the other hand, a long monitoring observation can be done with small and medium sized telescopes. The unknown physics information for small solar system bodies is clarified by such monitoring observations. We present the long monitoring observations of near-earth asteroid (8567). The results reveal that asteroid (8567) has a rotational period of  $0.364409 \pm 0.00003$  day, two possible rotational directions of  $(\lambda=105 \pm 15^\circ, \beta=35 \pm 15^\circ)$  and  $(\lambda=295^\circ, \beta=75 \pm 15^\circ)$ , a color of S-type asteroid, and Itokawa like shape: contact binary asteroid. Besides, we introduce the observation of extrasolar planets and mission target objects as adequate research targets for small and medium sized telescope.

Key Words: NEO, small solar system bodies, extrasolar planets, photometry

#### 1 はじめに

口径 0.3-2.0m 程度の中小口径望遠鏡は、大口径望遠鏡に集光力では劣るものの、比較的長期にわたる観測が可能という優位性がある。また、日本国内には口径 1m クラスの望遠鏡を備えた公開天文台や、口径 0.3m クラスの望遠鏡を持ったアマチュア天文家が多く、そのような施設・個人と連携することで様々な研究を行うことが可能である。本稿では、このような中小口径望遠鏡を使った研究課題のうち、我々がこれまで行ってきた惑星科学分野のトピックについて紹介する。

#### 2 観測対象

##### 2-1-1 太陽系小天体 -NEO-

これまで、美星スペースガードセンター(BSGC)では地球近傍小天体(NEO -Near Earth Objects-)の発見・監視を行うための観測を実施してきた。BSGCを含めた世界のスペースガード望遠鏡により、人類の存続に影響を及ぼすような直径 1km を超える NEO の約 90% が発見された。一方、NEO はこれまで発見に主眼がおかれてきたため、その諸物性を詳細に調べられている天体は一部だけである。NEO の諸物性を明らかにすることは、万が一 NEO が地球に接近・衝突するような場合の回避方法を検討するために必要であるばかりでなく、太陽系の形成過程を解き明かすための手がかりともなり重要である。

このような観点のもと、我々は地球近傍小惑星 8567 のライトカーブ観測と多色測光を行った。ライトカーブ観測は浜野和天文台(口径 0.4m)において、2008 年 7 月 28 日から 10 月 12 日に実施し、得られたデータから

自転周期  $0.364409 \pm 0.00003$  日を導出した。次にエポック法とアンプリチュード法<sup>1)</sup>を用いて自転軸方向の推定を行った。Fig. 1 がその結果である。解 1 ( $\lambda=105 \pm 15^\circ, \beta=35 \pm 15^\circ$ ) と解 2 ( $\lambda=295^\circ, \beta=75 \pm 15^\circ$ ) の二つの解がもっともらしい結果となった。二つの解の信頼度は同程度であり、一つの解に限定する事はできなかった。解 2 は自転軸が極方向を向いていることを示唆しており、そのため  $\lambda$  方向の不定性が大きくなる。さらに、ライトカーブからカサライネンモデル<sup>2)</sup>による形状モデルの作成を行った。解 2 の結果を初期値にして得た一例を Fig. 2 に示す。このモデル結果は、イトカワのライトカーブ観測から得た形状モデルと良く似ている。形状モデルでは凹面を表現することがやや難しく、小惑星 8567 の実際の形状は、イトカワの形状のように、コンタクトバイナリ小惑星である可能性が考えられる。小惑星 8567 は、アレシボ天文台においてレーダー観測が行われており、解像度は十分でないものの、コンタクトバイナリ小惑星である可能性を示している<sup>3)</sup>。

続いて、小惑星スペクトル型の分類と表面カラーの不均一性を調査するために、美星スペースガードセンター 1m 望遠鏡を用いて多色測光観測を行った。観測日は、2008 年 10 月 9 日から 18 日、使用したフィルターは SDSS の  $g', r', i', z'$  である。本観測では、ライトカーブの極小期付近(位相 A, C)と極大期付近(位相 B, D)の四箇所について多色測光を実施した。得られた結果を color-color diagram にまとめたものを Fig. 3, Fig. 4 に示す。図中のアルファベットは、Ivezic 2001<sup>4)</sup>を参照に color-color diagram 上での小惑星スペクト



ル型がどこにプロットされるか示したものである。本観測の結果、位相 B, C, D において小惑星 8567 の表面は S 型小惑星と同様なカラーをしていることを示している。また位相 A においては、A 型小惑星の特徴を持つ事を否定できないものの、S 型小惑星の特徴が最も確からしいと思われる。従って、小惑星 8567 は位相 A 付近にわずかな表面の不均一性のある S 型小惑星であると考えられる。なお、本観測の測光誤差は、主に測光標準星の光量が十分でなかったことと、標準等級へ変換する際の誤差に依存している。

以上のように、中小口径望遠鏡を用いた様々な測光観測から小惑星の物理情報を導出することが可能である。このような観測を多くの太陽系小天体に対し実施することで、各物理量の相関関係といった統計的な議論も可能となる。

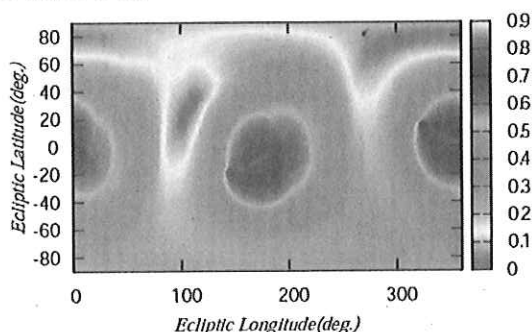


Fig. 1. エポック法とアンブリチュド法から推定した自転軸方向。解 1 ( $\lambda=105\pm 15^\circ$ ,  $\beta=35\pm 15^\circ$ ) と解 2 ( $\lambda=295^\circ$ ,  $\beta=75\pm 15^\circ$ ) の二つの解が考えられる。

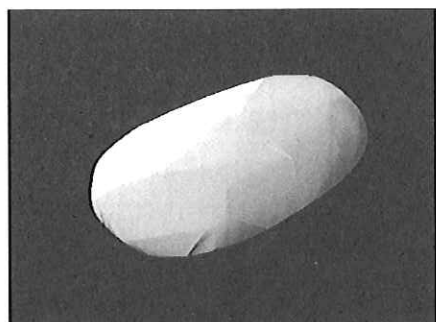


Fig. 2. ライトカーブから得られた形状モデルの一例。小惑星を回転楕円体と仮定したときの、短軸方向からの俯瞰。

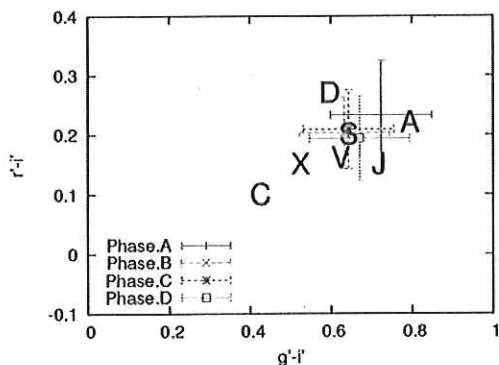


Fig. 3.  $g' - r'$  等級,  $r' - i'$  等級の color-color diagram.

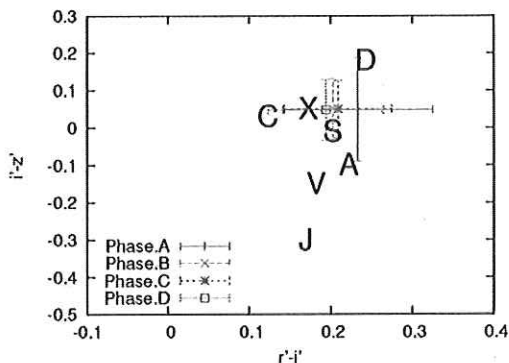


Fig. 4.  $r' - i'$  等級,  $i' - z'$  等級の color-color diagram.

### 2-1-2 太陽系小天体 -NEO/探査候補天体-

はやぶさによるイトカワの探査が行われ、理学、工学の両面にあたり非常に大きな成果をもたらした<sup>9)</sup>。はやぶさに続き、はやぶさ2、はやぶさ Mk2 などの始原天体探査ミッションが検討されている。はやぶさ2では地球近傍小惑星である C 型小惑星 1999JU3 が探査候補天体に上がっている。また、はやぶさ Mk2 では小惑星・彗星遷移天体と考えられている 107P/4015 Wilson-Harrington が探査候補の一例として想定されている。これらの探査のためには、事前に対象天体に対して長期的な地上観測を行い、自転周期や形状などできるだけ詳細の情報を収集することが重要である。1999JU3 に関しては、これまで中小口径望遠鏡で十分な地上観測が行われ、サンプル回収が可能な程度の自転周期であることや球形に近い形状をしていることが分かっている<sup>9)</sup>。107P/4015 Wilson-Harrington に関しては、2009 年から 2010 年にかけてプロ・アマが協力した地上観測キャンペーンが実施されている。最新の情報については <http://staff.aist.go.jp/r.nakamura/campaign/index.html> を参考にされたい。

### 2-2 系外惑星

これまで 400 個を超える系外惑星が発見されている。代表的な系外惑星の発見方法に、ドップラーシフト法とトランジット法がある。いずれの方法も中小口径望遠鏡で実施可能であるが、ドップラーシフト法は高分散分光器やヨードセルといった装置が必要となり、公開天文台やアマチュア天文家が実施するには困難である。ここでは、トランジット法による系外惑星観測を紹介する。トランジット法とは、系外惑星がその主星を掩蔽することで起こる主星のわずかな減光を検出する方法である。トランジット法による系外惑星の発見は、COROT<sup>7)</sup>や Kepler<sup>8)</sup>のような宇宙望遠鏡、WASP<sup>9)</sup>や HAT<sup>10)</sup>のような地上観測チームによりなされている。日本の晴天率や、公開天文台等の設備を考慮すると、これらの観測チームのように、新たな系外惑星系を発見することは困難である。しかしながら、既知の系外惑星系の追観測は十分可能である。特に、近年、TTV(Transit Timing Variation)というトランジット観測が盛んになってきている。これは、トランジットが起こる既知の系外惑星系のライトカーブを詳細に観測し、減光が発生する時刻のずれから、その系外惑星系に新たな惑星を検出する方法である。これまで、既知の系外惑星系 HD17156 に対しての TTV 観測が、アマチュ



ア天文家を含めた国内の観測者で行われている。このようなトランジット観測は、悪天候のリスク回避や、相互の観測・解析技術向上のため観測ネットワークを構築することが重要である。すでに国内では、いくつかの中小口径望遠鏡施設やアマチュア天文家が協力し、トランジット法による系外惑星の観測体制が構築されている。(日本トランジット観測ネットワーク:  
<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/transit/pukiwiki/index.php>)。このようなネットワークに参加し、トランジット観測を行う事で、比較的口径の小さな望遠鏡であっても、科学的に価値の高い観測を実施することが可能である。

### 3 まとめ

中小口径望遠鏡を用いた観測対象のうち、惑星科学分野のトピックについて紹介した。長期間の測光観測が可能という特徴を生かすことで、太陽系小天体の自転周期、自転軸方向、形状の解明が可能である。これらの情報は、惑星科学、スペースガードの両面において重要である。また、系外惑星や探査候補天体の地上観測を行う事で、最新の天文研究や始原天体探査計画に、公開天文台やアマチュア天文家が携わる事ができることを紹介した。このような観測は、科学的に価値が高いだけではなく、生涯学習機会の提供、天文文化の普及という公開天文台が担う役割にも非常に大きな効果を生むと思われる。国内には、口径1mクラスの公開天文台が多く、名寄1.6m望遠鏡も完成を間近に控えている。このような中小口径望遠鏡をうまく連携させることで、惑星科学分野に多くの成果を生み出すことが可能である。

#### 参考文献

- 1) Magnusson, P., 1986. *Icarus* 68, 1-39.
- 2) Kaasalainen, M., Torppa, J., Muinonen, L., 2001. *Icarus* 153, 37-51.
- 3) Benner, Lance A. M., et al., 2008. DPS meeting #40, #25.03; *Bulletin of the American Astronomical Society* 40, 432.
- 4) Ivezić, Z., et al., 2001. *AJ* 122, 2749-2784.
- 5) Fujiwara, A., et al., 2006. *Science* 312, 1330-1334.
- 6) Abe, M., et al., 2008. 39th Lunar and Planetary Science Conference, held March 10-14, 2008 in League City, Texas. LPI Contribution No. 1391., p.1594.
- 7) Barge, P., et al., 2008. *A&A* 482, L17-20.
- 8) Borucki, William J., et al., 2010. AAS Meeting #215, #101.
- 9) Cameron, A. Collier., et al., 2007. *MNRAS* 375, 951-957.
- 10) Bakos, G.A., et al., 2007 *ApJ* 656, 552-559.

(2010年1月22日受付, 2010年2月14日受理)