

地球接近天体の観測的研究

浦川 聖太郎

〈日本スペースガード協会 美星スペースガードセンター
〒714-1411 岡山県井原市美星町大倉 1716-3〉
e-mail: urakawa@spaceguard.or.jp



スペースガードを行うためには、地球接近天体を発見することと並行して、万が一、地球接近天体が地球へ衝突するような事態になったときに備え、地球接近天体の素性（自転周期、形状、構成物質、構造など）について、知見を深めておくことが必要です。折しも、2016年に大ヒットした映画「君の名は。」では、地球接近天体の分裂現象が物語の重要な役割を担っていました。映画を一つのきっかけとして、地球接近天体がどのような天体であるのか、興味をもっていただければと考えています。本稿では、筆者らがこれまで観測対象とした三つの地球接近天体の研究を例に、その観測の特徴や、観測から明らかになる地球接近天体の素性について紹介します。

1. 地球接近天体の観測

1.1 地球接近天体の観測意義

スペースガードにおいて重要な観測は、地球接近天体（Near-Earth Object; 以下、NEO）を発見し、その軌道を求め、地球へ衝突するか否か判断することです。そのような観測と並行して、スペースガードのためには、NEOがどのような天体であるのか理解を深めておく必要もあります。例えば、NEO全体としてのサイズ分布がわかっていると、どのくらいの大きさのNEOがどのくらいの確率で地球へ衝突するのか推定することができます¹⁾。また、一つひとつのNEOに対して、自転周期、形状、構成物質、構造といった情報を取得し、そのデータを蓄積していくことで、NEOがどのような素性をしているのかわかってきます。NEOの素性がわかれば、万が一、地球に衝突することが現実になった場合、その対策を立てることができるでしょう。また、NEOに対する理解を深めることは、太陽系の形成過程を解明する手がかりにもなります。なぜなら、NEOを構

成する小惑星や彗星は、太陽系形成期の情報や、現在に至るまでの衝突・破壊・合体の歴史を反映した天体だからです。加えて、地球に近づくNEOは探査機を送り込みやすい天体とも言えます。探査計画を立案するうえで、NEOの自転周期や形状といった情報は非常に重要となります。さらに、探査技術の発展の先には、NEOへの有人探査・資源採取という展望も存在します²⁾。そして、探査技術の発展は、NEOが地球へ衝突することを防ぐための技術として、スペースガードにフィードバックされます。このように、NEOの観測は、単にNEOを発見するだけにとどまらず、天文学、惑星科学、宇宙開発の発展に寄与できる高い科学的意義をもっています。

1.2 NEO観測の特徴

恒星、銀河、ガス雲など、観測天文学における多くの観測対象は、はるか遠方にあり、人間の寿命のタイムスケールの中に、その距離が大きく変わることはありません。そのため、天文学者はより遠くの天体をより詳しく調べるために、より大型の望遠鏡を必要としてきました。しかし、地球

に衝突する可能性を有する厄介なNEOですが、観測を行ううえでは有利な点があります。NEOの方から地球に近づいてくるのです。そのため、NEOを観測するために必ずしも大型の望遠鏡を必要としません（もちろん、可能であれば大型の望遠鏡を使用したいのですが）。また、ある日、突然発見され、発見後の数日間のみが観測好機となるNEOも多く存在します。NEOは突発天体としての特徴も有しています。したがって、NEOを観測するには、即座に観測体制を取れるような観測所・望遠鏡の利用が適しています。はじめに、このようなNEO観測の特徴を反映した例として、小惑星2011 XA₃に対する研究成果について紹介します。

2. 高速自転小惑星2011 XA₃

小惑星2011 XA₃（以下、XA3）は、2011年12月15日にハワイのPan-STARRS（パンスターズ；米国の主要なスペースガード望遠鏡）で発見されました。発見後、美星スペースガードセンター（以下、BSGC）をはじめとするさまざまな観測所で、即座に追観測が行われました。その結果、XA3の暫定的な軌道は、軌道長半径=1.48 au、離心率=0.93、軌道傾斜角=28°.1、昇交点黄経=273°.1、近日点引数=323°.8であり、ふたご座流星群の母天体と考えられている（3200）Phaethon（以下、ファエトン）の軌道、軌道長半径=1.27 au、離心率=0.89、軌道傾斜角=22°.2、昇交点黄経=265°.3、近日点引数=322°.1と一見すると類似していることがわかりました。このことは、東京流星ネットワークの大塚勝仁氏から、すぐに指摘されました。一般に、流星群の母天体は彗星であるのですが、ふたご座流星群の母天体ファエトンは小惑星に分類されています。最近になり、ファエトンにダス

トの尾が検出されています³⁾、流星群を形成するほど十分なダストがどのように供給されたのかはよくわかっていません。もし、過去に何らかの原因でファエトンが分裂したのであれば、そのときに発生したダストがふたご座流星群の素となり、そして、その分裂破片がXA3であるというシナリオが成り立ちそうです。実際、小惑星2005 UDと小惑星1999 YCは、ファエトンを起源とする天体であると指摘されています^{4),5)}。小惑星2005 UDと小惑星1999 YCの反射スペクトルタイプ*1は、ファエトンと同様のB/F/C型（いずれも広義にはC型と分類されるタイプ）であることがわかっています⁶⁾⁻⁸⁾。XA3が、分裂破片であればファエトンも広義のC型小惑星であると考えられます。小惑星の反射スペクトルタイプを推定するには、多色測光観測が有効です。しかしながら、楕円体である小惑星は、自転に伴い太陽光の散乱断面積が変化し、明るさも変化します。つまり、フィルター交換を行っている間に明るさが変化してしまうのです（MuSCAT⁹⁾やMITSuME¹⁰⁾のような多色同時カメラがあれば、この制約を受けません）。したがって、多色測光と平行してライトカーブ観測を行い、自転による光度変化の影響を補正しなければなりません。幸いにも、BSGCには口径1 mと50 cmの2台の望遠鏡があります。そこで、1 m望遠鏡でg', r', i', z'フィルターを用いた多色測光観測を、50 cm望遠鏡でライトカーブ観測を2011年12月19日に実施しました。

多色測光観測の結果が図1となります。図中の“Phase 0.6-0.8”とは、後述する図2のライトカーブにおいて、自転位相が0.6から0.8の間のデータのみを用いた観測結果です。小惑星は、表面全体が一様な物質で覆われているとは限りません¹²⁾。

*1 小惑星における反射スペクトルタイプとは、波長毎の反射特性の違いを表したものであり、表面物質を反映したものと考えることができる。代表的なものに、炭素質コンドライト（含水ケイ酸塩鉱物や有機物を含む隕石）と同様な物質を含むと考えられているC型小惑星（例えば小惑星リュウグウ）や普通コンドライト（含水ケイ酸塩鉱物や有機物を含まず、主にケイ酸塩鉱物からなる隕石）と同様な物質を含むと考えられているS型小惑星（例えば小惑星イトカワ）がある。

そのため、ライトカーブ観測から散乱断面積の変化による光度変化を補正しても、表面物質の非一様性による光度変化が2色図に含まれている可能性があります。これを補正するためには、 g', r', i', z' すべてのデータが同じ自転位相で取得されている必要があります。今回の観測では、自転位相が0.6から0.8の間にだけ g', r', i', z' 4色すべてのデータがそろいました。図中の“Other”は、自転位相が0.6から0.8以外でのデータの平均となります。XA3の表面物質が一樣と仮定できるなら、このデータも信用に値します。この観測では、データ不足により表面物質の非一様性に関する議論はできませんでしたが、“Phase 0.6-0.8”と“Other”の中間付近の値が、XA3の大局的な色指数と言えます。つまり、図1から読み取ると、XA3はS型あるいはV型の小惑星であると言えます。反射スペクトルタイプがファエトンと異なるので、XA3はファエトンからの分裂破片であるという直接的な証拠になりませんでした。加えて、ファエトンとXA3の軌道を過去にさかのぼった数値計算を行ったところ、両天体が同一の起源であると言えますませんでした。残念ながら、当初想定していたようなシナリオどおりの観測結果とはなりませんでしたが、しかしながら、ライトカーブ観測から興味深い結果が得られました。XA3は自転周期43.8分的高速自転小惑星であったのです(図2)。

高速自転小惑星が、どのような小惑星であるかは天文月報2011年5月号¹³⁾に詳しく解説されているので、ここでは簡単に紹介します。直径10 km程度以下の小惑星の構造は、複数の岩塊が重力で弱く結合したラブルパイル構造と、単一岩塊そのものからなる一枚岩構造に分けられます。有名なラブルパイル構造の小惑星は、小惑星探査機「はやぶさ」が訪れたイトカワです。探査を行えば、小惑星がラブルパイル構造か一枚岩構造であるか判別できます。しかし、探査機を頻繁に小惑星に送ることはできません。そこで、観測的な手法による判断が必要となります。判断の指標となる物

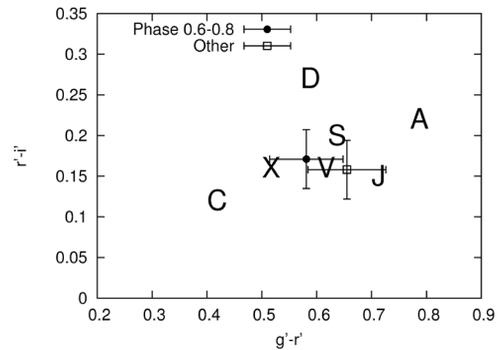


図1 XA3の2色図の一例。図中の大文字のアルファベットは小惑星の反射スペクトルタイプ別のおおよそのプロット位置を示す¹¹⁾。ここでは割愛したが、 $r'-i'$ vs $i'-z'$ の2色図も得られている。

理量が小惑星の自転周期です。小惑星の自転周期が2.2時間以下になると遠心力が重力に打ち勝ち、ラブルパイル構造を維持できなくなります。つまり、高速自転小惑星とは、自転周期が2.2時間以下の一枚岩構造の小惑星であると言えます。

また、室内衝突実験の結果から、一枚岩構造の小惑星の多くは、母天体小惑星で起きた衝突事象により発生したのではないかと考えられています¹⁴⁾。これまで発見されている一枚岩構造の小惑星のほとんどは、直径200 m以下の小惑星です。一枚岩構造の小惑星の直径の上限やサイズ分布を解明することは、小惑星における衝突の物理を理解するうえで重要な情報となります。XA3の直径は 225 ± 97 m (典型的なS型小惑星の反射率を仮定)あるいは 166 ± 63 m (典型的なV型小惑星の反射率を仮定)とわかりました。反射率による誤差を含むものの、XA3を明らかに超える大きさの高速自転小惑星は、小惑星2001 OE₈₄¹⁵⁾と小惑星(335433)¹⁶⁾しかなく、XA3は非常にまれな大型の高速自転小惑星であることがわかりました。

高速自転小惑星は100天体程発見されているものの、その発見には多少の幸運が必要です。海外の研究者から、何回目の挑戦でこれほど大きい高速自転小惑星を発見したのかと質問を受け、1回目だと返答すると驚かれたことがあります。しか

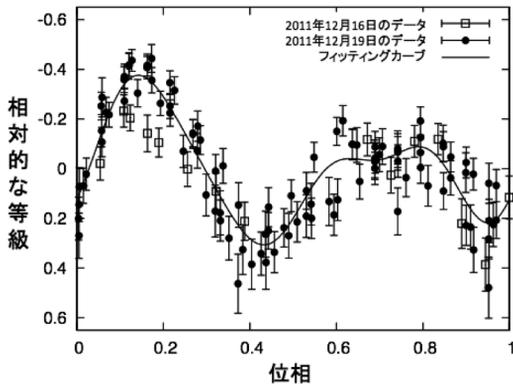


図2 自転周期43.8分でのXA3のライトカーブ. 12月16日のデータはXA3の軌道を求めるために1 m望遠鏡で行った観測から得られた. 12月19日のデータは50 cm望遠鏡によるデータ.

し、その幸運を引き寄せたのは、常に観測体制にあるBSGCの環境があればこそその成果でした。また、XA3の軌道がファエトンに類似していることを即座に指摘した、アマチュア天文家（と、言っても大塚氏は主著論文を出版するようなアマチュアであります）の存在が重要な役割を果たしました。太陽系天体の観測では、時にアマチュア天文家が大きな活躍をします。次は、その例として2012 DA₁₄の観測について紹介します。

3. 2012 DA₁₄の分光観測

小惑星2012 DA₁₄（以下、DA14）は2013年2月15日に地球表面から27,700 kmまで接近したNEOです。BSGCでは、DA14の接近に伴い取材を受けていたのですが、DA14の最接近の16時間前にロシア・チェリャビンスク州に隕石落下が起こり、取材内容はほとんどチェリャビンスク隕石関連になったという裏話があります。ともあれ、DA14の接近も静止衛星の軌道である高度約36,600 kmより内側を小惑星が通過するという、非常にまれな現象であることに変わりはありません。先に述べたように小惑星にはさまざまな反射スペクトルタイプがあります。このうちS型小惑星は長年の宇宙風化作用により、Q型小惑星から

変化したものと考えられています¹⁷⁾。DA14のように、小惑星が地球に接近した場合に、潮汐力により小惑星表面がリフレッシュされ、表面下の宇宙風化を受けていない物質が表面に露出する可能性があります^{17), 18)}、つまり、潮汐力が有用に働けば反射スペクトルタイプの変化が起こると考えられます。DA14の地球への接近は、このような変化を捉える良い機会となります。

DA14は、2012年に発見されたために、2013年2月15日に接近し、明るさは7等級程度まで増光することは事前にわかっていました。そこで、埼玉大学55 cm望遠鏡（可視測光観測）や兵庫県立大学西はりま天文台なゆた望遠鏡（近赤外3色同時観測）と協力して、DA14の観測キャンペーンを実施しました。BSGCでは、可視測光観測を予定していたのですが、機器の不具合のためDA14の観測を実施することはできませんでした。しかし、埼玉大学での観測からDA14の自転周期の推定や、DA14の表面が粗い粒径の粒子で覆われている可能性（あるいは、高い反射率をした表面であること）を示すことができました¹⁹⁾。近赤外3色同時観測の結果からは、DA14の表面に明確な不均一性がないことと、反射スペクトルタイプが他の観測所の結果²⁰⁾と矛盾しないことがわかりました²¹⁾。本稿では、当初予定していなかった可視分光観測の結果について述べます。

可視分光観測はアマチュア天文家の藤井貢氏（倉敷市）によって行われました。藤井氏は自作の40 cm望遠鏡に自作の分光器を取り付け、主に恒星の分光観測を行っているアマチュア天文家です。アマチュア天文家の素晴らしい点は、珍しい天文現象はひとまず観測を行ってみようという点にあると思います。藤井氏はDA14の接近情報を得ており、分光観測に挑戦しました。DA14は地球に非常に接近するため、天球上を $\sim 1,400''/\text{min}$ の速さで移動します。そこで、CCDカメラで露光を行いつつ、望遠鏡をDA14に合わせて手で追尾し、少しずつスリット内にDA14からの光を落と

し込む方法を用い、有効な積分時間を得ました。これは、藤井氏の熟練の望遠鏡操作技術と、DA14が東西方向への移動が小さく、ほぼ南北方向への移動だけであったことが幸いして可能になった観測方法です。観測結果の速報を藤井氏から拝見した筆者は、反射スペクトルタイプの推定に有効なデータであると判断しました。観測結果が図3となります。さまざまな反射スペクトルタイプの小惑星と観測データを比較した結果、DA14はS型小惑星のサブグループであるL型小惑星に最も近いと判明しました。この観測結果は、約8時間半後に口径10.4 mのGran Telescopio Canarias（カナリア大望遠鏡、スペイン・カナリア諸島）で行われた観測結果²⁰⁾と一致するものでした。これは、われわれの観測とカナリア諸島での観測の間で、少なくとも表面の反射特性は変わらなかったことを示す結果となります。このように、口径40 cmの望遠鏡であっても、観測好機を上手く捉えることで、口径10.4 m望遠鏡と同様の観測成果を上げることができるのがNEO観測の面白さの一つであります。

NEO観測のもう一つの面白さとしては、小惑星探査計画に携わることができる点も挙げられます。最後に、小惑星探査計画に関する観測例として107P/(4015) Wilson-Harrington（ウィルソン-ハリントン）の研究成果について紹介します。

4. 107P/(4015) Wilson-Harrington

107P/(4015) Wilson-Harrington（以下、WH）は、1949年に彗星として発見された天体です²²⁾。その後、再検出されていなかったのですが、1979年に発見された小惑星1979 VA=(4015)と同一天体であることがわかりました。つまり、WHはかつて彗星活動が見られたものの、彗星活動を停止し、小惑星へと姿を変えた天体となります。WHとは反対に、小惑星が突如彗星活動を起こすこともあり、特に小惑星帯（メインベルト；火星軌道と木星軌道の間に位置）の小惑星が彗星活動を起

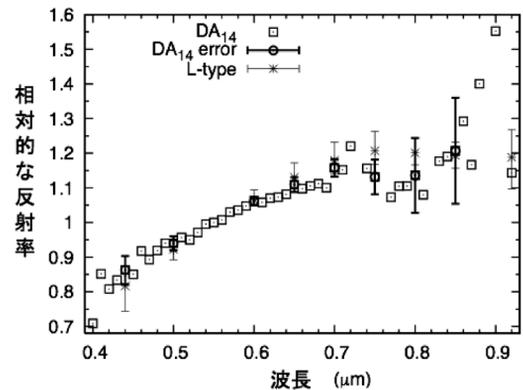


図3 DA14と典型的なL型小惑星の反射スペクトルタイプとの比較。0.55 μm での反射率で規格化している。“DA14 error”は0.05 μm ごとの反射率の平均値と誤差を示す。“L-type”は典型的なL型小惑星の分光データを示す。

こすとメインベルト彗星と呼ばれます²³⁾。WHの現在の軌道は、軌道長半径=2.039 au、離心率=0.626、軌道傾斜角=2°.785でありNEOに分類されます。しかし、数値計算でWHの軌道をさかのぼり、その起源を推定すると3.2 au付近の外側のメインベルト帯の可能性が高いと考えられています²⁴⁾。外側のメインベルト帯は、メインベルト彗星が多く存在している領域でもあります。したがって、WHはメインベルト彗星のような天体がNEOへ軌道進化したものなのかもしれません。ところで、小惑星の反射スペクトルタイプの軌道別の存在割合を見ると、太陽に近い側から、NEO領域にS型小惑星、メインベルト帯にC型小惑星、木星トロヤ群領域にD型小惑星が多く存在しています²⁵⁾。また、S、C、Dといくにつれ、より始原的な（熱などの影響を受けていない）天体と考えることができます。小惑星探査機「はやぶさ」はS型小惑星イトカワを探査しました。「はやぶさ2」はC型小惑星リュウグウを探査します。C型小惑星には、炭素質コンドライトに含まれるような水や有機物があると考えられています。この流れに従うと、次はD型小惑星を探査したくなります。D型小惑星の起源の候補として、海王星外縁領域

のカイパーベルト天体が考えられています^{26), 27)}. つまり、D型小惑星は彗星活動を起こしていない彗星核のような天体と考えることができます。彗星核ということは、水や有機物がかなり豊富に含まれているはずですが、しかしながら、木星トロヤ群という遠く離れたD型小惑星を探索するには長い時間を要します²⁸⁾. そこで、有力な探索候補天体となるのがWHです。WHは、はやぶさ2に続いて提案されていた「はやぶさマーク2」計画の探索候補天体でした。WHは過去に彗星活動を起こした点からも、彗星のような天体であると言えます。加えて、NEOであるWHはD型小惑星に比べると、探索しやすい天体と言えます。探索計画を立てるためには、WHがどのような天体であるか明らかにしておく必要があります。特に、自転周期や形状は、サンプルリターンを行う上で重要な情報となります。そこでWHの地上観測キャンペーンを行いました。

観測は2009年9月から2010年3月まで、BSGC、岡山天体物理観測所50 cm望遠鏡、東京大学木曾観測所1.05 m望遠鏡、ルーリン天文台1 m望遠鏡、ハワイ大学2.24 m望遠鏡で行われました。可視光観測から得られたライトカーブが図4となります。興味深いのは0.2979日の自転周期の間に6回の光度変動があり、そのピーク間隔がちょうど、0.2979日の1/3である0.0993日となる点です。この解釈として、WHが六角形状をしていると考えることができます。ただ、六角形という対称的な形状を小惑星が取りうるのだろうかという疑問も残ります。例えば、小惑星(2867)シュテインスは、ダイヤモンド形状をしていることがロゼッタ探査機により明らかになりました²⁹⁾。また、小惑星(66391)=1999 KW₄ (以下、KW4)は、YORP (ヨーブ) 効果^{*2}により赤道付近に表面物質が集まり、対称的な円盤形状をしていると考

えられています^{30), 31)}。これらの例から、六角形状も十分に考えられそうです。さらに、KW4にはKW4から分離した伴星小惑星の存在がレーダー観測から確認されています³²⁾。WHが、KW4と同じように伴星小惑星を従えているのなら、伴星小惑星の公転運動により、6回の光度変動が現れたと考えることもできます。

6回の光度変動に対する別の解釈は、WHのタンブリング運動(歳差回転)です。WHは0.2979日で自転しつつ、0.0993日の周期でタンブリング運動をしていると考えることができます。タンブリング運動をしている小惑星では、複数の周期が重なりあったようなライトカーブになります(例えば、小惑星(4179)トータチス³³⁾)。ところで、観測キャンペーンではさまざまな位相角(太陽-WH-観測者のなす角)からWHのライトカーブを取得することができました。こうしたライトカーブデータを蓄積することで、WHの形状モデルを作成することができます。六角形状とタンブリング運動に対する形状モデルが図5となります。

タンブリング運動を仮定すると、WHの形状は図5(右)のような縦長となり、通常考えられている横長の小惑星と異なる形状となります。一方、中国の探査機嫦娥2号による探査で、(4179)トータチスが縦長形状であることがわかりました³⁴⁾。必ずしも、縦長形状の小惑星が存在しないわけではなさそうです。もしタンブリング運動が実際に起こっているとすると、その原因は何でしょう?一つの可能性として、ほかの小惑星の衝突が考えられます。そして、他的小惑星の衝突がWHの彗星活動の原因となったのかもしれませんが。

最後の解釈として、自転周期が0.2979日の半分の0.1490日であり、ライトカーブに3回の光度変動があるモデルを提唱しておきます。3回の光度変動の原因としてWHのクレーター地形が考

*2 YORP効果とは、小惑星のような不均一な形状の天体で発生する、非等方的な熱輻射による熱的トルクである。この熱的トルクにより直径5 km程度以下の小惑星の自転は加速あるいは減速する。

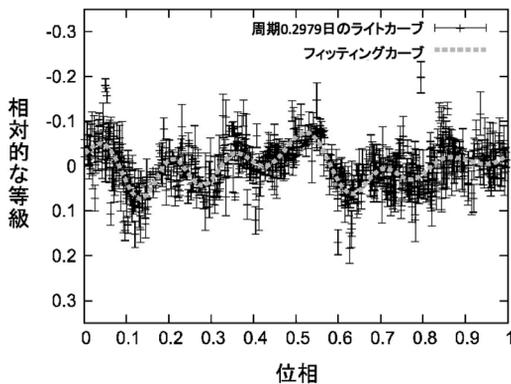


図4 自転周期0.2979日でのWHのライトカーブ。

えられます。観測キャンペーンの期間中、位相角0度付近のデータがありませんでした。つまり、WHの表面に大きなクレーターのような地形があれば、影ができ、そのことで3回の光度変動を示すライトカーブを生み出すことができます。

この観測キャンペーンによって、過去の観測にはない長期に渡る測光精度の良いデータを取得することができました。詳細なデータが取得できたために、さまざまな解釈が成り立つモデルを提唱できましたが、モデルの決定には至りませんでした。位相角0度付近のデータがあれば、クレーター地形による影が発生しないため、少なくとも、自転周期が0.2979日か0.1490日か判断できるようになります。しかしながら、位相角0度付近で観測できる、次の観測好機は2019年2月頃となります。このように、追観測のタイミングが限られてしまう点がNEO観測の歯がゆい部分でもあります。現在、WHへの探査計画は一度白紙へと戻っていますが、この間にWHに対する観測を実施し、さまざまなモデルのうち、どれが正解であるか決定しておくことが重要です。観測による科学成果を元に、将来WHへの探査を実現したいと考えています。

5. まとめと今後の展望

本稿で、NEOの観測的研究について筆者らが

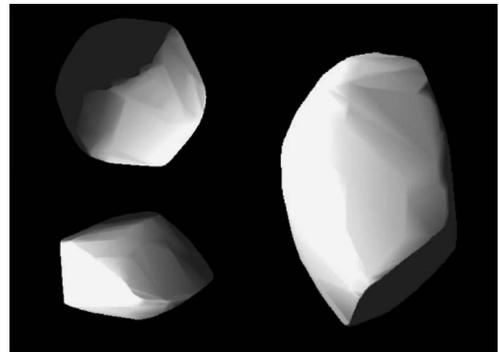


図5 (左上) 六角形状を仮定した時の形状モデルを極方向から俯瞰。(左下) 六角形状を仮定した時の形状モデルを赤道方向から俯瞰。(右) タンプリング運動を仮定した時の形状モデルを赤道方向から俯瞰。極方向からの俯瞰は割愛するが、丸みを帯びた正方形形状をしている。

行った研究を中心に紹介しました。ここで紹介した研究はいずれも中小口径望遠鏡を用いて、実施したものです。中小口径望遠鏡がいかにNEO観測で有用であるかわかっていただけたのではないかと思います。一方で、筆者らが取り組めていない、レーダーを用いたNEOの形状推定³⁵⁾、大口径望遠鏡を用いた分光観測²⁰⁾、宇宙望遠鏡を用いた網羅的な観測^{1), 36)}といった研究も存在します。最後に、スペースガードの今後の展望を述べて本稿を締めたいと思います。スペースガード観測における国際的な目標は、2030年までに直径140 m程度のNEOの90%を発見することとなっています。直径1 km以上の明るいNEOがほとんど発見された現在の状況では、BSGCの1 m望遠鏡で目標に貢献することは困難です。NEOの発見を行うには、圧倒的に深い観測を行うか、圧倒的に広い観測を行う必要があります。現在、すばる望遠鏡HSC (Hyper Suprime-Cam) や、東京大学木曾観測所で開発中の超広視野高速CMOSカメラ (Tomoe Gozen) を用いたNEO観測が計画されています。こうした装置を用いたサーベイ観測が、NEOの発見に有効ではないかと思われます。さらに、スペースガード観測の発展に伴い、一時的

に地球の重力に捕らえられ、衛星のように振る舞うNEOも発見されています³⁷⁾。このような天体は、探査機を送り込むのが容易であり、資源利用できるかもしれません。筆者自身は、地球以外の天体の資源を地球で消費すると、地球という閉じた系によくないことが起こりはしないかと少し不安なのですが、地球圏外で行う宇宙開発では有効な資源利用なのかもしれません。NEOを観測していくことで、こうした未来の宇宙開発の姿を描くこともできます。

謝辞

本稿の内容は、筆者らが発表した論文^{38)–40)}に基づき要約、加筆を行ったものとなっています。詳しくは論文をご覧くださいと思います。本稿で、中小口径望遠鏡の有用性に触れましたが、このような研究は、多くの天文台・観測所のスタッフ・学生の協力があってこそ成り立つ研究です。本当にたくさんの研究協力者に感謝いたします。高橋隼氏、寺居剛氏、藤井貢氏には執筆にあたり有益なコメントをいただきました。ありがとうございます。

参考文献

- 1) Mainzer A., et al., 2011, ApJ 743, 156
- 2) Abell P.A., et al., 2016 in Asteroid IV, eds. Michel P., DeMeo F. E., Bottke W. F. (The University of Arizona Press, Tucson) pp. 855–880
- 3) Jewitt D., Li J., Agarwal J., 2013, ApJ 771, L36
- 4) Ohtsuka K., et al., 2006, A&A 450, L25
- 5) Ohtsuka K., et al., 2008, M&PSA 43, 5055
- 6) Jewitt D., Hsieh H., 2006, AJ 132, 1624
- 7) Kinoshita D., et al., 2007, A&A 466, 1153
- 8) Kasuga T., Jewitt D., 2008, AJ 136, 881
- 9) Narita N., et al., 2015, JATIS 1, id. 045001
- 10) Kotani T., et al., 2005, Il Nuovo Cimento C 28, 755
- 11) Ivezić Ž., et al., 2001, AJ 122, 2749
- 12) Yoshida F., et al., 2004, PASJ 56, 1105
- 13) 中村士, 吉田二美, 2011, 天文月報104, 238
- 14) Kadono T., et al., 2009, Icarus 200, 694
- 15) Pravec P., et al., 2002, in Proc. ACM. 2002, ed. Wambeen B. (ESA SP-500; Noordwijk, Netherlands: ESA), 743
- 16) Chang C.-K., et al., 2014, ApJ 791, L35
- 17) Binzel R. P., et al., 2010, Nat. 463, 331
- 18) Nesvorný D., et al., 2010, Icarus 209, 510
- 19) Terai T., et al., 2013, A&A 559, id. A106
- 20) de León J., et al., 2013, A&A 555, id. L2
- 21) Takahashi J., et al., 2014, PASJ 66, id. 537
- 22) Fernandez Y. R., et al., 1997, Icarus 128, 114
- 23) 石黒正晃, 2012, 天文月報105, 750
- 24) Bottke W. F., et al., 2002, Icarus 156, 399
- 25) DeMeo F. E., Carry B., 2014, Nat. 505, 629
- 26) Morbidelli A., et al., 2005, Nat. 435, 462
- 27) Walsh K.J., et al., 2011, Nat. 475, 7355
- 28) Kawaguchi J., et al., 2014, in Proc. ACM. 2014, ed. Muinonen K. (Helsinki, Finland)
- 29) Keller H. U., et al., 2010, Sci. 327, 190
- 30) Bottke W. F., 2008, Nat. 454, 173
- 31) Walsh K. J., Richardson D. C., Michel P., 2008, Nat. 454, 188
- 32) Ostro S. J., et al., 2006, Sci. 314, 1276
- 33) Spencer J. R., et al., 1995, Icarus 117, 71
- 34) Huang J., et al., 2013, Nature Scientific Reports 3, id. 3411
- 35) Ostro S. J., et al., 1999, Sci. 285, 557
- 36) Usui F., et al., 2013, ApJ 762, id.56
- 37) de la Fuente M. C., de la Fuente M. R., 2016, MNRAS 462, 3441
- 38) Urakawa S., et al., 2011, Icarus 215, 17
- 39) Urakawa S., et al., 2013, PASJ 65, id.L9
- 40) Urakawa S., et al., 2014, AJ 147, id.121

Observational Study of Near-Earth Objects

Seitaro URAKAWA

Bisei Spaceguard Center, Japan Spaceguard Association, 1716-3 Okura, Bisei, Ibara, Okayama 714-1411, Japan

Abstract: Discovery and astrometry of near-Earth Objects (NEOs) is a main purpose of the spaceguard. On the other hand, the physical properties of NEOs (the rotation periods, the shapes, the component materials, the structures, etc.) are also important information to prevent the impact hazard, when the impact of a NEO becomes a reality. This article picks up three examples for the observational study of NEOs, and introduces how to clarify the physical properties of NEOs by the observational methods.