

〈2011年度日本天文学会天文功労賞（長期的な業績）受賞〉

小惑星の詳細な測光観測



浜野和弘己

浜野和弘己・浜野和博子

〈浜野和天文台 〒969-1204 福島県本宮市糠沢字光が丘4-34〉

e-mail: hamaten@poplar.ocn.ne.jp

小惑星の登録天体数は2008年9月に19万2千個を超え、その後も急速に増加している。しかしながら小惑星の自転周期や形状をはじめとする固有の物理的な性状が判明しているのは、その中のごく一部に限られている。浜野和天文台では小惑星の詳細な測光観測を継続して行い、自転周期や光度変化量などを正確に求め公開している。また若い番号をもちながらも、いまだに自転周期などが解明されていない小惑星に対して、世界中の研究者と協力観測を行い、観測・調査しデータベースを充実させるプロジェクトに参画している。

1. はじめに

小惑星観測の第一ステージでは、観測技術の進歩とともに多くの小惑星が発見され、それらの軌道要素も正確に確定されました。また太陽系内での位置や公転軌道の特徴により小惑星を分類してきました。その結果、膨大な数の小惑星が登録され、さらに正確な位置の推算もできるようになりました。

最近では小惑星を始原天体として位置づけ、太陽系の成因や生命の起源を探る目的で、研究的な観測が多くなされるようになりました。ことにわが国の「はやぶさ」による小惑星「イトカワ」の探査をはじめ、新たな手法を用いて世界各国が行っている種々の観測などは、新たなステージへの展開を迎えたと言っても過言ではないでしょう。

このように小惑星の研究が多様化するとともに、新たな情報を得る必要性が生じてきました。すなわち「直径の大小」「自転周期の長短」「スペクトル型の違い」「組成の違い」「生成年代」などにより小惑星を分類するために、自転周期、自転による変光幅、反射スペクトル型、表面の組成、

形状などを調査するための観測が必要になってきました。

しかしながら現状では、全体のごく一部の天体についてしか、詳細な観測がなされていない状況にあるのです。膨大な数の小惑星に対して、これらの観測と解析は、多くの時間と労力を必要とします。また望遠鏡をはじめ、相応の観測施設が必要となります。これらの条件が障壁となり、いまだに手付かずの小惑星が多いのです。私たち浜野和天文台の観測チームは、観測対象を小惑星に限定することで、観測技術の向上を図り、詳細で正確な観測結果を得るための研鑽を続けています。このようにして観測、解析した結果は、世界中の小惑星研究者に提供し、共有されることを目的として、私たちのURLに掲載しています¹⁾。

2. 観測と解析

私たちが独自のテーマをもって測光観測を計画する場合、対象とする小惑星を選定するときに、第一に観測効率を良くする目的で衝の位置付近の対象を選びます。その条件で抽出した複数の小惑星の中から、私たちの観測施設で観測可能なも



図1 浜野和天文台の観測設備、観測ドーム内のD=400 mm, f1=1,800 mmメイン望遠鏡および浜野和と共同観測者である妻の博子。

の、また過去に観測例がない、または少ないものなどの制約を与えることにより選出しています。

すべての観測は福島県の郡山市郊外に位置する浜野和天文台で行っています。4.3 mの観測ドーム内に設置された望遠鏡は40 cmの反射式赤道義で、オートガイド機能で天体を追尾します。これらの望遠鏡とドームは私が自作したもので、長時間に及ぶ過酷な連夜の観測にも、十分にその性能を発揮しています。

接眼部には冷却CCDカメラをセットし、さらに測光用のフィルター（主にUBVRIシステムのRやVなど）を装着して観測を行います。

観測ドーム内には望遠鏡を制御するためのPCと、冷却CCDカメラの各種の設定と撮像を行うためのPC、さらに対象確認用のPCを配置しています。測光観測を行っているときのドーム内は無人で、私たち観測者は観測準備室（隣の建物）のPCで、撮像された画像を取り込みます。そして撮像と同時に並行して画像解析を行います。

2.1 小惑星の測光観測に必要な情報の取得

最初に観測時間における小惑星の位置情報をインターネット経由で取得します。私はLowell天文台の「ASTEROID FINDER CHART」²⁾とNASAの「HORIZONS Web-Interface」³⁾を利用してします。

前者は小惑星を含む観測用の星野チャート、後

者は指定した時期とタイムスパンにおいて、小惑星が位置する赤道、黄道座標や太陽位相角などの各種情報を入手することができます。特に後者は観測結果の解析や、複数回の観測や他の観測所の結果を比較し、統合するにあたり重要なデータを含んでいますので入手が必須です。

小惑星の導入確認のために、星図ソフトをインストールしたPCに、観測を行う日時に小惑星が位置している星野を表示し、さらに私の観測システムの写野も表示しておきます。このモニターと、実際に撮像しているCCDカメラの画像を表示したモニターを比較し、対象の導入に間違いがないことを確認した後で連続撮像を開始します。

2.2 実際の観測

小惑星の測光観測の手法は、対象が刻々と移動していくことを除けば、変光星の測光観測とほぼ同じです。観測には良質なフラットフィールド画像とバイアスやダークフレーム画像、そして実際のオブジェクト画像が必要です。オブジェクトフレームは自動化されたインターバル撮像方式で取得しています。積分時間は観測対象の光度により決定し、通常60秒から300秒程度に設定しています。毎夜の観測継続時間はできるだけ長く行います。

2.3 画像の解析

画像解析には「IRAF」などの測光用ソフトを用います。取得したオブジェクトフレームは、規格化したフラットとダーク画像を用いて補正します。この後に10個程度の基準星を決め、小惑星とそれらとの間で光度の比較解析を行います。このようにして1枚の画像から露出の中央の時刻と、小惑星の光度情報が得られます。当夜に取得したすべての画像に対して、同様の処理を行います。

異なった観測日の観測結果から、光度変化の一定の周期性、すなわち小惑星の自転周期を求めるために、周期解析ソフトを用います。

解析によって得られた自転周期で、すべての取

得した画像の時刻データたみ込みます。この自転に伴う位相変化を0から1の数値を取って横軸に、またそれぞれの位相における光度変化量を縦軸にプロットして「小惑星の光度曲線図」が完成します。このグラフを「小惑星のライトカーブ図」と呼ぶこともあります。

3. 浜野和天文台の観測成果

浜野和天文台が行った詳細な測光観測で、対象とされた小惑星はすでに81個を数えています。これらの観測成果の多くは解析を完了した後、すぐに私たちのURLにアップロードされました。その結果、世界の多くの研究者から共同研究の要請を受け、観測結果を提供しました。そして意見交換などの後に、多くの論文として出版されています。以下に私たちの成果をご紹介します。

3.1 測光観測による成果の例

図2は2007年11月16日から、同年の12月26日までの13夜に及ぶ(562) Salomeの測光観測結果です。私たちが観測を行う以前に、この小惑星の自転周期は、過去にBinzelが行った観測により0.43 dayとされていました。しかしながら小惑星の自転周期等の測光観測結果を掲載したMinor Planet Lightcurve Parametersによる観測結果の評価はランク-1と低いものでした⁴⁾。

私たちはSalomeを詳細に観測し、その結果新しい自転周期： 0.529375 ± 0.000008 dayを解明しました。この自転周期に包括されるエラーは、1自転あたり ± 0.7 秒と限りなく正確な数値です。さらに私たちはこの観測データをジュネーブ天文台のRaoul Behrendに送り、確認の解析を依頼しました。その結果は全くわれわれの数値と同じであり、現在Behrendとともに、MPCに向けてこの新しい自転周期を採用するよう申請しています。

このように、詳細な測光観測の結果に得られる小惑星の情報は非常に精密であり、過去の観測結果を更新し続けています。また浜野和天文台で

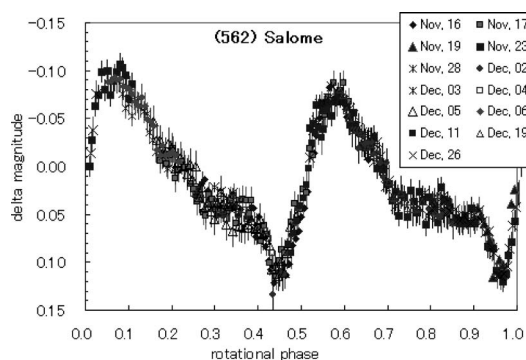


図2 (562) Salomeの光度曲線図, 自転周期: 0.529375 ± 0.000008 day. Amplitude: 0.207 ± 0.004 mag 浜野和天文台。

は、小惑星の測光観測結果をMPCやジュネーブ天文台にも提供しています。そして測光観測のデータベースとして広く利用されています⁵⁾。

3.2 詳細な測光観測がもたらす副産物

また1期の観測結果において、興味深い結果が得られた対象に対しては、引き続き、または別の時期に複数回の観測を行います。

例えば2008年に私たちは(279) Thuleの測光観測を行いました⁶⁾。この小惑星は木星の3:2の共鳴軌道に位置してThule族をなしています。しかしながらその興味深い軌道や若い番号にもかかわらず、詳細な観測はほとんど行われていませんでした。

2008年にThuleが恒星を掩蔽する現象が予報されて、日本の複数の地点で観測に成功し、そしてこの小惑星の断面形状がユニークに求められました。掩蔽を起こした時刻のThuleの位相を解明する事は、将来Thuleの立体形状を議論する際に、大きな手がかりとなります。そこで浜野和天文台では測光観測を開始しました。4月3日から開始された観測により、大型の小惑星に特有なダブルピークをもつ、ゆったりした光度曲線が観測されました。ところが4月6日に行った観測では、その光度が、平常の光度曲線に対して急に暗くなり、そして暫く後に、通常の光度に戻りました。

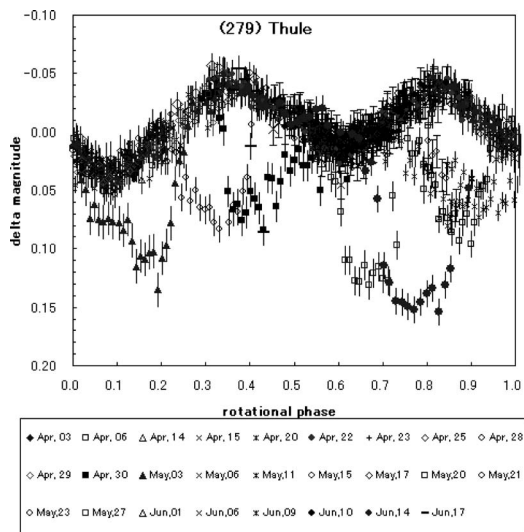


図3 (279) Thuleの光度曲線図, 0.3100 dayの自転周期 変光幅0.081等級の通常の光度曲線の中で相互食に起因する減光が周期的に発生した。

この現象は小惑星本体とその衛星により引き起こされる相互食に特有の減光であります。したがってThuleが衛星をもつ可能性があり、検証観測を行う必要が生じました。私たちは延べ26夜の測光観測を行い、その観測期間の8夜の観測で特有の減光を観測しました。一連の観測でThuleの衛星の公転周期を 3.007 ± 0.002 dayと求めました。

私たちは即この結果を世界の観測者・研究者に発信し確認観測を依頼しましたが、公転周期が地球の自転とシンクロし、さらに観測好機を過ぎていたために、他国で現象をとらえることはできませんでした。Thuleは8年後に同じ観測条件を迎えるために、世界中の観測所が観測キャンペーンを張り、確認観測が行われることになっています。

3.4 未解明の小惑星の観測プロジェクト

自転周期がまだ解明されていない1千番未満の小惑星に対して、世界中の数カ箇所からの協力観測が計画されます。私たちはこの種の観測において、重要な位置を占めています。すなわち夜を

つないで行う観測は、分散された世界の数カ所から行われるべきなのですが、日本をはじめ東洋の諸国では、この種の観測に携わる観測者が少ない、否、現在は私たち浜野和天文台のみです。したがって私たちには世界中からのオファーが多く集まる状況にあります。若い番号をもつ小惑星ながらも、その特性が未解明である要因は、

1. 自転周期が長い
2. 自転周期が地球の自転とシンクロしている
3. 自転に伴う光度変化量が小さい

などが挙げられます。

観測の実例として、最近行った観測キャンペーンの小惑星名と観測結果、および参加した観測所の所在地を以下に示します。

(202) Chryseis⁷⁾

観測結果 $R_p: 23.670 \pm 0.001$ h Amp: 0.20 ± 0.02 mag, 観測地: CA—USA, Las Cruces—USA, Asti—ITALY, Fukushima—JAPAN

(280) Philia⁸⁾

観測結果 $R_p: 70.26 \pm 0.03$ h Amp: 0.15 ± 0.02 mag, 観測地: Las Cruces—USA, CA—USA, SERBIA Asti—ITALY, Fukushima—JAPAN

(180) Garumna

観測結果 $R_p: 23.861 \pm 0.001$ h Amp: 0.41 ± 0.02 mag, 観測地: Las Cruces—USA, SERBIA, Fukushima—JAPAN

以上の例はいずれも若い番号の小惑星で、その自転周期が地球の1自転、または3自転と近似しているために、地球上の1カ所からの観測では、自転に伴う全周の位相を観測することが不可能でありました。今後も小惑星のデータベースの充実を図る目的で、継続した協力観測を行います。

3.5 浜野和天文台の研究対象

私たち浜野和天文台では、長期間にわたり(624) Hektorの詳細な観測を継続しています⁹⁾。トロヤ群に属するこの小惑星は、木星のラグランジュポイント(L4)に位置しています。これらの小惑星は太陽から遠く離れていて、太陽系の誕生

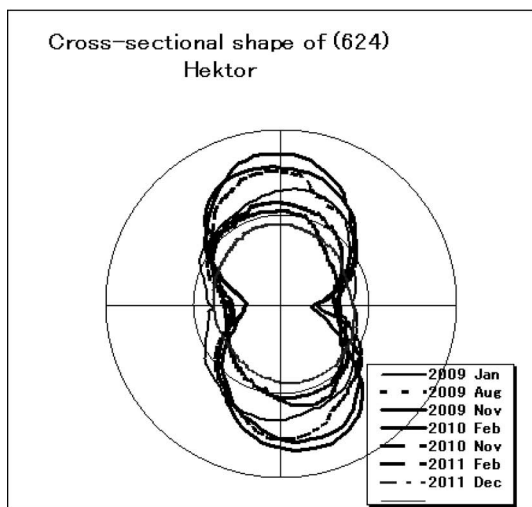
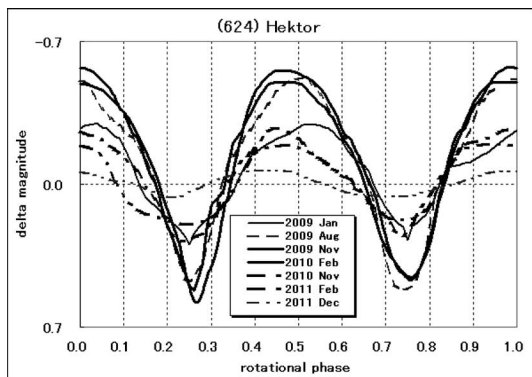


図4 (624) Hektorの光度曲線の変遷(上)と、それに対応する断面形状の変遷(下)。Hektorの公転軌道は傾斜角が大きいため、観測時期によってさまざまな方向からHektorを観測することになり、立体形状解明の手がかりになる。

から現在までに、宇宙風化の影響をあまり受けていないことが予想され、始原天体としての注目を集めています。

2008年に開始した私たちのHektorの観測は、これまでに8期、延べ85夜を数えました。そして一連の観測で撮像した画像は、6千枚を超えています。観測の手法は「通常の測光観測」、小惑星のスペクトル型を検証する「多色測光観測」、そして表面の情報を得るための「Hektorの光度の太陽位相角依存性の観測」と多岐にわたります。

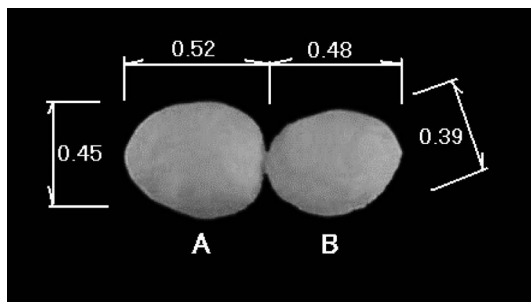


図5 長期の詳細な観測により求めた(624) Hektorの立体形状。図はHektorの南極方向からの眺望でa軸とb軸を示す。c軸はA: 0.44, B: 0.35である。

通常の測光観測は、光度の変化量が大きく、特徴的な光度曲線からHektorがバイナリ小惑星であることを解明しました。さらにHektorの公転軌道の傾斜角が大きいため、地球からの視線方向の自転軸の傾斜角が、観測時期により大きく変化します。私たちは長期の測光観測で、異なる自転軸の傾斜角における多量のデータを採取しました。そしてこれらの結果を統合して、Hektorの立体形状を解明しました。Hektorは同程度の2個の小惑星により構成されており、2個の主軸は直線的ではなく屈曲して集合しています。しかしながら地上観測からは、Hektorが結合系であるか、近接系であるかの解明はいまだできていません。

Hektorのスペクトル型を検証するために、多色測光観測を2009年12月から行いました。この時期のHektorは光度の変化量が1.16等級で、最大の値を示していました。すなわち視線方向の自転軸の傾斜角が大きいため、構成する2個の小惑星が相互食を起こしていたのです。交互に食を起こしているときにスペクトル型を観測すると、構成するそれぞれの小惑星の「色」を観測することが可能であるはずですが、このようなアイデアから行った観測の結果、2個のスペクトル型はいずれもD型で、表面の組成が同じであるとの結果を得ることができました。

また異なる太陽位相角(太陽-小惑星-観測



者がおりなす角度)において、絶対測光観測を行いました。この観測から求めたHektorの絶対等級は7.5等級、Slope Parameter (G),すなわち表面の状況を示す要素は0.15と求めました。これらの値は過去の観測結果とほぼ同等であり、それらを検証する結果となりました。

4. 小惑星観測の今後の展開

私たち、浜野和天文台は現在、Planetary Science Instituteに属する NEOWISE Science Team のTommy Gravらと協力して、より詳細に(624)Hektorの物理的な特性を解明するために、新しいプロジェクトを立ち上げました。私たちが行った(624)Hektorの膨大な測光観測の結果と、the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE)が行った観測結果を統合することで、より詳細なHektorの立体形状や、表面の特性などを解明することを共通の目的としています。

彼らとの協力観測は、小惑星の研究的な観測において、新たな方向性を示すことができるでしょう。

参考文献

- 1) <http://www2.ocn.ne.jp/~hamaten/astlldata.html>
- 2) <ftp://ftp.lowell.edu/pub/bas/starcats/loneds.phot>
- 3) <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>
- 4) Binzel R. P., 1987, Icarus 172, 135
- 5) <http://www.unige.ch/~behrend/page2cou.html>

- 6) <http://www2.ocn.ne.jp/~hamaten/00279thule-lc.html>
- 7) Stephens R. D., Hiromi Hamanowa H., 2011, Minor Planet Bulletin 38, 208
- 8) Pilcher F., Hamanowa H., 2011, Minor Planet Bulletin 38, 127
- 9) <http://www2.ocn.ne.jp/~hamaten/00624hektor.html>

The Detailed Photometric Observations for the Asteroid

Hiromi HAMANOWA and Hiroko HAMANOWA
Hamanowa Astronomical Observatory, 4-34 Hikarigaoka, Nukazawa, Motomiya, Fukushima 969-1204, Japan

Abstract: The number of the subscribed asteroids are beyond 192,000 in September, 2008, and increasing rapidly after that too. However, the asteroid where the physical characteristic of the rotation period and the shape and so on was already searched for is a few numbers. We seek the correct rotation period and the amplitude of the asteroid by doing the detailed photometric observations at the Hamanowa Astronomical Observatory, then, we make public the result immediately. Also, a lot of asteroids which have a young number but the rotation period and so on weren't made clear yet exist. To make the property of such asteroid clear, we are observing in the cooperation with the researcher of all over the world. Enriching for the data base of the asteroid by the project of such observations. The data base of the asteroid is enriched by the such observation project.