

(624) Hektorの詳細な測光観測結果

浜野和 弘巳

浜野和天文台

The detailed photometric observation result of (624) Hektor

Hiromi HAMANOWA

Abstract

Photometric Observations for (624) Hektor were obtained in the period from 2008 December to 2012 January at the Hamanowa Astronomical Observatory using a 0.4-m Pellow reflector. The derived synodic real rotation period for lightcurves was $0.2883520(\pm 0.0000003)$ day. The amplitudes of the lightcurves were respectively 0.59 (2009 Jan), 1.04 (2009 Aug), 1.16 (2009 Nov), 1.02 (2010 Feb), 0.39 (2011 Feb) and 0.13 (2011 Dec) mag. The shape of Hektor, therefore, is a binary asteroid from its big amplitude change.

Key Words: Hektor, photometric observation, binary asteroid

1 観測目的

(624) Hektorは木星トロヤ群に属するD型の小惑星で1907年にアウグスト・コプフにより発見され、仮符号は1907XMである。この小惑星の物理性状はDunlapらによる1969年の論文で、自転周期や自転に伴う光度変化量等が報告された。1993年にはP. Tangaらがハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測で、Hektorが近接した二重小惑星であるらしい事を発表した。さらに2006年には、ケック天文台のAOを用いた観測で、この2重系にはさらに、平均距離が約1000km離れた位置に直径15km程度の衛星が存在することが観測された。しかしながらHektorの詳細な形状や、表面組成、自転軸の向きなど多くの物理的性状は未だに解明されていない。

私たち浜野和天文台では、この興味深い小惑星に対し未解明の各種の物理的性状を解明する目的で、長期間の継続的な測光観測を計画し、そして一連の観測を2008年の12月29日に開始した。私たちが解明を試みる対象の情報は、正確な自転周期（対恒星周期）、観測各期の自転に伴う光度変化量（Amplitude）、断面形状など広範囲にわたる。そして一連の観測の結果を統合して、詳細な立体形状や自転軸の向き、自転の方向（正転、逆転）等も明らかにする計画である。

また多色測光観測を行い、Hektorの反射スペクトル型を再検証することや、さらに光度の太陽位相角依存性の観測を行い、その地表面の情報を解明することなど、観測の目的は多岐に渡っている。

Hektorの公転軌道は、小惑星のメインベルト帯の遙か外側に位置し、木星のL-4（トロヤ群）に属する。その公転周期は木星とほぼ同じで約12年である。

このように太陽からの距離が遠いことにより、宇宙風化の影響をあまり受けて来なかったと推測される。またHektorは三重小惑星であるらしく、この小惑星系を探索することにより、トロヤ群の3個の小惑星の情報を効率良く観測することが出来る。このように始原天体としての観測意義は非常に大きい。

従って将来の木星圏ソーラー電力セイルミッションにおける始原天体探索の最有力候補として、強く推奨するものである。Hektorに関する浜野和天文台の一連の観測が、将来の探索計画の一助と成ることを夢見つつ、私たちは継続して観測を行っている。

2 観測

2.1 R-バンドによる通常の測光観測

(624)Hektorに関する全ての観測は、浜野和天文台の40cm $f=1800\text{mm}$ のニュートン式反射赤道義を用いて行った。自転周期や自転に伴う振幅を観測する通常の



図1. 浜野和天文台の観測風景

表1. 各観測時期の(624) Hektorの位置情報と観測された自転に伴う光度の振幅

Session	Dates (YY MM DD)	hEcl-Lon (deg.)	hEcl-Lat (deg.)	Phase (deg.)	PAB-L (deg.)	PAB-B (deg.)	Amplitude (mag.)
1 Lightcurve obs	From 2008 Dec-29 To 2009 Jan-28	24.2 26.6	12.3 12.8	10.6 9.9	18.9 21.6	12.5 12.5	0.59
2 Lightcurve obs	From 2009 Aug-14 To 2009 Sep-06	42.7 44.6	15.9 16.1	11.0 10.5	48.5 50.1	15.9 16.8	1.04
3 Lightcurve obs	From 2009 Nov-06 To 2009 Nov-18	49.7 50.7	16.8 16.9	4.0 4.0	50.4 50.1	18.7 18.8	1.16
4 Multi-color obs	From 2009 Dec-07 To 2010 Jan-02	52.3 54.5	17.1 17.3	6.1 9.2	49.7 49.8	18.8 18.4	—
5 Lightcurve obs	From 2010 Feb-03 To 2010 Mar-11	57.2 60.2	17.6 17.8	10.8 9.5	51.6 55.4	17.8 17.1	1.02
6 Lightcurve obs	From 2011 Feb-03 To 2011 Feb-23	88.7 90.4	17.5 17.4	17.5 17.4	84.1 84.9	18.7 18.0	0.39
7 Lightcurve obs	From 2011 Nov-26 To 2011 Dec-17	114.2 116.0	13.8 13.5	9.7 7.1	119.2 119.5	14.7 14.7	0.13
8 Phase-curve obs	From 2011 Nov-08 To 2012 Jan-17	112.7 118.6	14.2 12.9	10.8 3.0	118.3 119.0	14.6 14.4	—

測光観測はSBIGのST-8E冷却CCDカメラとR-バンドパスフィルター（UBVRI系）を用い、望遠鏡は自動追尾モード、冷却CCDカメラも自動撮像モードに設定し180から300秒の積分時間で撮像した。画像解析のソフトウェアはIrfatなどを使用し、取得した画像に対して、ダークフレームとフラットフィールドの一次処理を行い、その後測光解析の手法に従って解析作業を行っ

た。この手法により観測を開始した2008年から現在に至るまでに6期の観測を実施した。観測の結果、正確な自転周期を求め、さらに光度変化量が観測時期により大きく変化することを見出した。観測時期の小惑星の位置情報などを表1に記した。また得られた光度曲線を図2に示した。光度の変光幅を示す縦軸は全てのグラフを同一のスケールに統一してある。

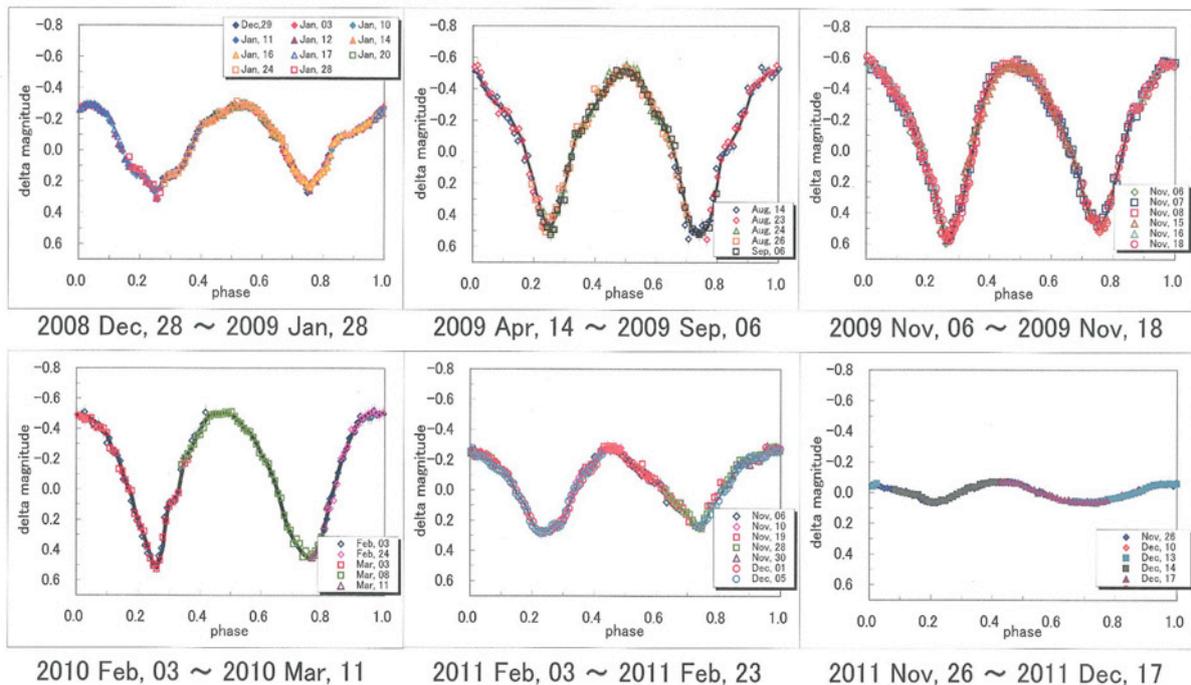


図2. 各観測時期の(624) Hektorの光度曲線図

2.2 多色測光観測と光度の太陽位相角依存性の観測

(624) Hektorの反射スペクトル型を検証し、色指数(カラーインデックス)を求めるために、多色測光観測を2009年の12月から開始した。さらに小惑星の表面の情報を得るために、Hektorの光度の太陽位相角依存性の観測を2011年の11月から実施した。

多色測光観測に使用した測光用フィルターは、Idas製のUBVRI系のうち、BVRIの各フィルターを用いた。対象を撮像する観測の直前に、浜野和天文台における大気による吸収の影響、すなわちエアマスの補正係数を求める観測、さらに標準システムへの変換係数を求める観測を実施し、それぞれの数値を求めた。本観測は小惑星と同程度のエアマスに位置する測光標準星を選定し、フィルターを換えながら標準星、次に小惑星を撮像する手順を繰り返し、双方を交互に観測した。

3 観測結果

3.1 R-バンドによる測光観測結果

2008年に行った第1期の観測で求めたHektorの自転周期は $R_p: 0.288375 \pm 0.000014 \text{ day}$ であった。その後6期の測光観測の結果を統合し、位相差を補正して得られた自転周期は $0.2883520 \pm 0.0000003 \text{ day}$ と求められた(対恒星周期)。さらに観測時期の経過に伴い、地上から観測する位相が進行して行くことが明らかになり、Hektorの自転は逆行回転であることが判明した。

自転に伴う変光幅(Amplitude)は観測時期により大きく異なることが観測され、2009年の11月に変光幅は最大の1.16等級を示した。その後は減少し2011年の2月には変光幅が0.13等級と激減した。観測各時期の振幅の値を表1の末尾に掲載した。またその著しい変化は図2の各期の結果を比較することにより明らかである。

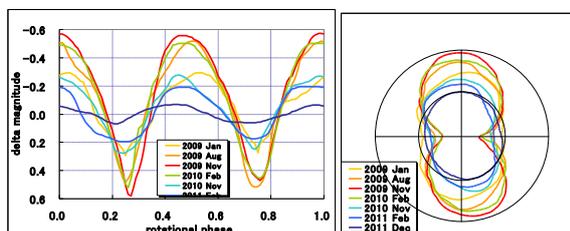


図3. 各観測時期の(624) Hektorの振幅と断面形状の変遷(Rバンドパスフィルター使用)

図3は、それらの光度曲線を1枚まとめたグラフと、それぞれの時期の光度曲線に解析を加えて得た断面形状の変遷を示した。特に2009年の11月に観測した断面形状(赤で記載)は、バイナリ小惑星特有の形状を示している。地球から観測したHektorの自転軸の傾斜角は、この時期に一番大きかったことが解析された。

3.2 多色測光観測と光度の太陽位相角依存性の観測結果

多色測光観測は2009年の12月から2010年の1月に浜野和天文台で行った。本観測に入る前に浜野和天文台で使用しているフィルターや冷却CCDカメラ、そして望遠鏡などの機器を用いて観測した結果を、標準システムに変換するための観測を行った。それぞれのカラーインデックスごとの補正係数を求め図4に示した。

またエアマスの補正係数を求める観測の結果を図5に示す。グラフ内の計算式は、得られた観測結果を外挿してエアマス0、すなわち大気圏外等級に変換するための変換式を示す。

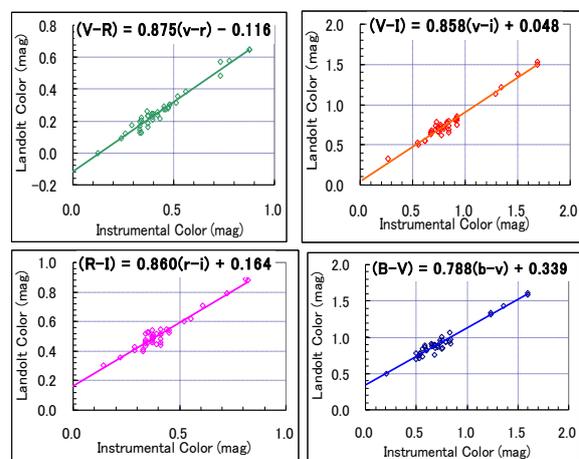


図4. 標準システムへの変換係数を求める観測結果

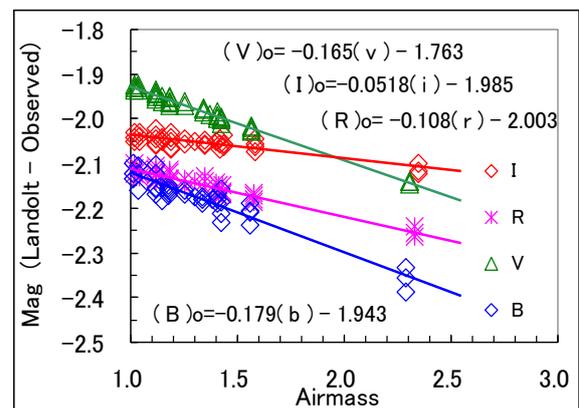


図5. エアマスの補正係数を求める観測結果

多色測光観測で得られた観測結果を解析するにあたり、単色光で得られた正確な光度曲線も必要で、その観測時期は光度の振幅が変化しない同時期の結果が必要である。浜野和天文台ではRバンドによる単色光観測を2009年の11月に行い、詳細な光度曲線を取得した。

多色測光観測のデータを解析した結果、Hektorの反射スペクトルは典型的なD型であり、この小惑星の始

原天体としての優位性を実証する結果となった。

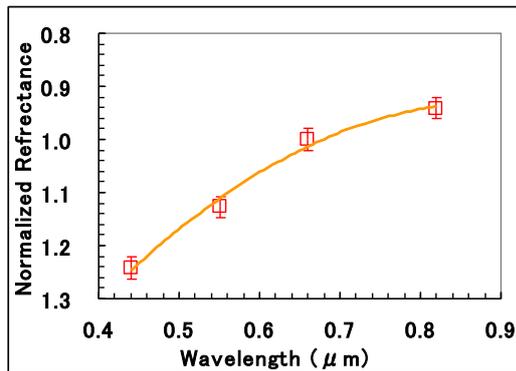


図6. (624) Hektorの反射スペクトル (D-type)

さらに、得られた全ての成果を図7にまとめて掲載した。グラフにはRバンドによる単色の測光観測結果を黒で記載した。また全周にわたり観測を行って得た色指数のR-Iを赤色で、V-Rを緑色、B-Vを青色、V-Iを桃色で示した。これらの色指数が自転による位相変化に伴い変化を示す場合は、異なった表面組成を持つことに起因することが推測されるが、観測で得られた結果は全周に渡って殆ど変化が見られなかった。

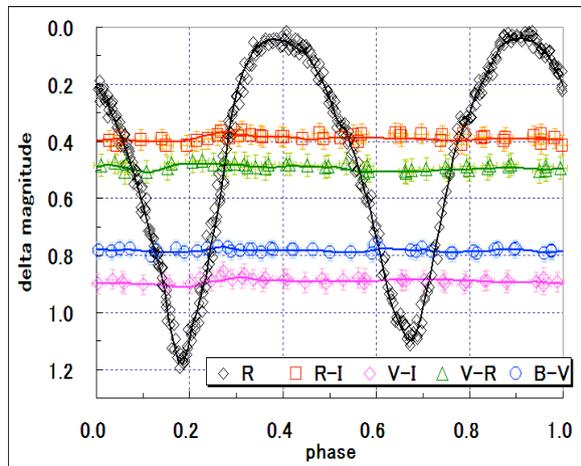


図7. Hektorの全周にわたる多色測光観測結果

グラフの位相0.1 から0.3 付近に僅かな変化を確認できるが、観測誤差の範囲内であると思われる。この結果からHektorの地表面は、全周にわたり一様に赤化していることが判明した。

Hektorの光度の太陽位相角依存性を調べるための観測を2011年11月8日に開始した。当日の太陽位相角は10.8度で、ほぼ最大の値であった。ここから太陽位相角は小さくなり、2012年の1月17日の観測時には、3.0度とほぼ最小の値を示した。

このようにHektorの太陽位相角の観測幅が狭い理由は、その公転軌道がかなり遠方に位置しているために、

Hektor—太陽—観測者により作り出す角度（太陽位相角）が最大でも11.0度までで、またHektorの公転軌道の

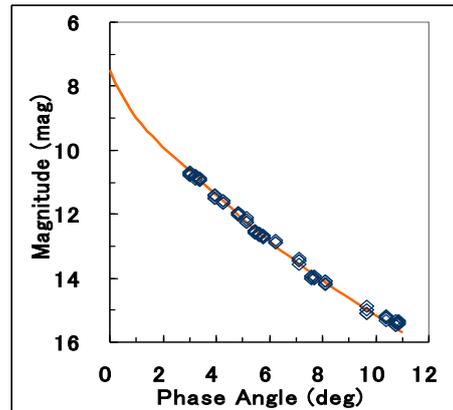


図8. Hektorの太陽位相角依存性の観測結果

傾斜角が18.2度とかなり傾いていることに起因して、最小でも3.0度を下回することは無い。

得られた観測結果を次の式に代入して、Hektorの絶対等級 (H₀) とスロープパラメータ (G) を求める。

$$H(\alpha) = H(0) - 2.5 \log \{ (1 - G) \phi_1(\alpha) + G(\phi_2(\alpha)) \}$$

解析の結果は、H(0) : 7.50、G : 0.15 であった。

4 Hektorの自転軸の方向の解析

6期にわたる詳細な観測の結果、取得した太陽位相角や光度変化の情報などの膨大なデータを使用して、以下の手法を用いてHektorの自転軸の向きを計算する。

Amplitude-method

$$B(A, \alpha) = 1.25 \text{Log} \left\{ \frac{(b/c)^2 + \cos^2(A) + \sin^2(A)}{(b/c)^2 \cos^2(A) + (b/a)^2 \sin^2(A)} \right\} + B\alpha$$

Epoch-method

$$(T_i - T_0) / P - n_i = (\theta_i - \theta_0) / 2\pi$$

それぞれに解析を行い解を得て、それらを統合した結果、624) Hektorの自転軸の方向は、 $\lambda_0 = 329 \pm 2^\circ$ 、 $\beta_0 = -25 \pm 2^\circ$ と求まった。この結果から、Hektorの自転軸は南天を指している、すなわち、その自転の方向は逆行回転をしていることが解明された、この結果は前記3-1で述べた結果と同じである。

次に、解析された自転軸の方向を基本として、浜野和天文台が観測を行った時期における、地球からの視線方向に対するHektorの自転軸の傾斜角を計算した。その結果と、観測で得られた自転に伴う光度変化量を同一のグラフにまとめた(図9)。観測の結果より解析した自転に伴う光度の変化量を青で記載した。また赤は、一連の解析で解明したそれぞれの時期の視線方向に対するHektorの自転軸の傾斜角 (Aspect Angle) を

示す。自転軸の傾斜角が最大となる時期に、光度の変化量 (Amplitude) も最大となる筈であるが、図9においては、その関係が明確に示されている。すなわち解析の結果得られた Hektorの自転軸の方向の優位性を裏付けている。

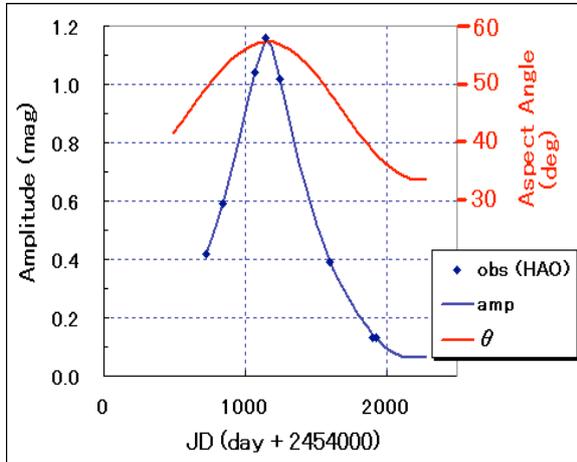


図9. Hektorの自転軸の傾斜角 (θ) と光度変化量

5 Hektorの立体形状の解明

前項3-1の図3に示されたように、Hektorの光度変化量は観測時期により大きな変化を示した。これらの観測時期の自転軸の傾斜角を算出し、さらに解析された各時期における断面形状を統合して、バイナリ小惑星Hektorの立体形状が明らかとなった。

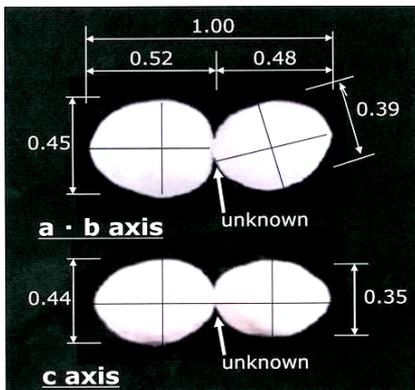


図10. Hektorの立体形状と構成する各々の軸比

私たち浜野和天文台のスタッフは、解析された立体形状を基に、Hektorのモデルを作成した。このHektorモデルに対して、太陽位相角 (光源の位置関係) や、自転軸の傾斜角等の諸条件を与えた上で、このモデルの測光を行った。製作した小惑星モデルの形状が、実際の小惑星の形状と近似しているならば、それぞれの光度曲線の形状や、光度変化量も同一の値を示す筈であるが、図10に示すモデルは与えた自転軸の傾斜角や太陽位相角の諸条件下で、実際に取得した光度曲線と

良い整合性を示した。すなわち作成したHektorモデルが実際の形状を良くトレースしている結果となった。

小惑星の立体形状を解明する手法は、Kasaleinenらにより提唱されている。しかしながら3軸不等の楕円体に近似した対象には適用するが、バイナリ系に対しての適用は未だ困難であるとの実感を持っている。このことはバイナリ度とも表現すべき、もう一つの因子が立体形状の解明に困難をきたしていると考えられる。

図3の各時期の光度曲線を詳細に検証すると、2つの極大光度と2つの極小光度の間が等間隔でなく、第一極小→第一極大→第二極小→第二極大→第一極小の位相差はそれぞれ、0.20、0.29、0.24、0.27と観測された。この結果はHektorを構成する2つの小惑星の主軸が屈曲していることに起因している (図10)。参考までに、小惑星が3軸不等の楕円体であるならば、それぞれの位相差は全て0.25となる。

これまでに行った観測と解析からは、Hektorを構成する2つの小惑星が、結合したコンタクトバイナリ系か、または近接した連星系であるかは解明できていない。現代の光学的な手法を駆使しても、解像度などの限界があり、従ってこの問題を解決する為には天体物理や天体力学的な解析を待つことになる。

6 Hektorのスペクトル型

6.1 バイナリ小惑星Hektorのスペクトル型

私たちの観測によりHektorが典型的なD型であることが証明された。しかし2009年の12月に多色測光観測を実行した主たる目的は、Hektorを構成する2つの小惑星それぞれの“色”を観測することにあつた。この時期には光度変化量が1.16等級と最大の値を示し、その自転軸の傾斜角は 57.3° とかなり立っていた。これらはHektorがバイナリ小惑星であり、構成する2つの小惑星により引き起こされる相互食の食分が、この時期にかなり大きかったことを意味する。

ここで構成する大きな小惑星をAとし、小さな方をBとすると ($A > B$)、光度曲線の主極小ではBがAを隠し、副極小ではAがBを隠している。つまりこの時期には、光度曲線の2つの極小時に多色測光観測を行うことにより、構成する2つの小惑星それぞれのスペクトル型を観測することが可能である。

図7に掲載した観測結果から2つの極小時の色指数には、変化が見られないことが解明され、その結果Hektorを構成する2つの小惑星のスペクトル型は、同一であることが導き出された。

6.2 Hektorと他天体のスペクトル型の比較

私たちが行ったHektorの多色測光観測の結果と、太陽系の他の天体を比較し、Hektorの始原天体としての

意義を検証する。図11はBarrucciらによるTNO、ケンタウルス族、トロヤ群に属する幾つかの小天体のB-V、V-Rの2色図で、右上に行くほど赤化し、左下ほど青化している。この図に赤でHektorの観測結果を記入した。この図でHektorは、記載された他のトロヤ群天体よりも赤化が進行していることが示されている。

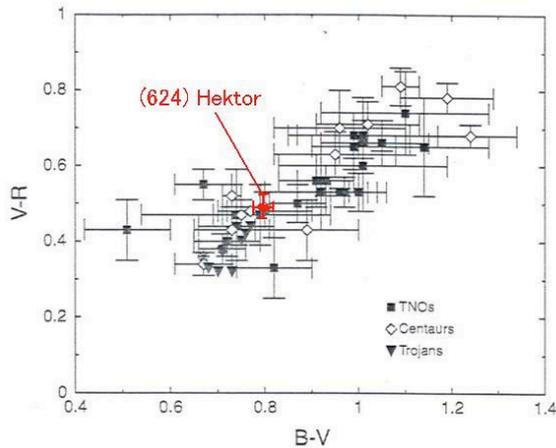


図11. Hektorと他天体の2色図による赤化の比較

さらに図12はD, P, Cruikshankらにより分類されたTNOのスペクトル型を示したグラフである。赤化の程度をBBからRRまでの4段階で示してあり、ここに私たちが観測したHektorの結果を記入し比較を行った。

その結果Hektorのスペクトル型はBR型のTNOのそれと全く同じであった。このことは両者の表面組成などが似ている事を示唆していて、まことに興味深い。

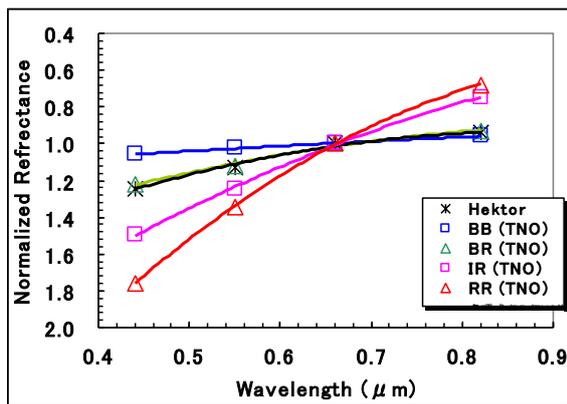


図12. HektorとTNOのスペクトル型の比較

7 本観測で解析したHektorに関する諸情報

- ・形状：パイナリ小惑星（結合か近接かは未だ不明）
- ・自転周期：0.2883520±0.0000003 day
- ・自転に伴う光度の振幅（Amplitude）：
 - 0.59 (2009 Jan), 1.04 (2009 Aug), 1.16 (2009 Nov)
 - 1.02 (2010 Feb), 0.39 (2011 Feb), 0.13 (2011 Nov)

- ・3軸比 (a:b:c) 全体：(1.00 : 0.45 : 0.44)
- ・3軸比 (a:b:c) 個別一大：(0.52 : 0.45 : 0.44)
- ・3軸比 (a:b:c) 個別一小：(0.48 : 0.39 : 0.35)
- ・自転軸の向き：hEcl-Lon：329 ± 2d
hEcl-Lat：-25 ± 2d
- ・自転の向き：逆行回転
- ・反射スペクトル型：D-type
- ・色指数：B-V=0.780±0.036 V-R=0.494±0.030
V-I=0.891±0.035 R-I=0.397±0.033
- ・絶対等級 H(o)：7.5等級
- ・スロープパラメータ G：0.15
- ・直径（主軸）：372kmと算出されたが誤差は大
- ・宇宙風化を受けて表面全体が一様に赤化

8 浜野和天文台における今後のHektor観測の展開

浜野和天文台における(624) Hektorの詳細な測光観測は今後も継続する予定で、最終的には1公転周期の全てをカバーしたいと思っている。これによりパイナリ小惑星に対するより詳細な情報を収集する。

また最近には、Planetary Science Institut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の新しいプロジェクトを立ち上げた。私達が行った(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る。

参考文献

- 1) Danlap J. L., Gehrels, T., (1969) *Lightcurves of a Trojan Asteroid*. *Astronomical Journal*. Minor Planets III.
- 2) Daisuke Kinoshita, Chin-Wei Chen., Zhong-Yi Li Kui-Yun Huang., Yung-Shin Chang., and Wen-Ping Chen. (2005) *Characteristics and Performance of the CCD Photometric System at Lulin Observatory*. *Chin. J. Astron. Astrophys.* Vol. 5, No. 3 315-326.
- 3) 野沢 由依. (2009) 小惑星の宇宙風化作用によるカラー変化の解析. 小惑星ライトカーブ研究会
- 4) 川上 恭子, 安部 正直, 北里 宏平, 猿楽 祐樹, 長谷川 直 and 吉川 真. (2008) 次期小惑星 探査候補天体のサーベイ観測. 小惑星ライトカーブ研究会.
- 5) Cruikshank D. P., Stansberry J. A., Emery J. P., Fernández Y. R., Werner M. W., Trilling D. E., and Reike G. H. (2005b) *Astrophys J.*, 624 L53-L56. Barucci M. A., Petit J. M., and Veillet C. (2005b) *Icarus*, 174, 90-104.
- 6) P. Tanga D. Hestroifer A. Cellino Y. Zappala et al. (2003) *Asteroid Observations with the Hubble Space Telescope* *A&A* 401. 733/741.

Takahashi, N., *Spaceguard*, JSGA, pp.11-21, 2012.

(2013年1月4日受付, 2013年1月25日受理)