

Sub-km サイズ地球近傍小惑星 2011 XA<sub>3</sub> の高速自転浦川 聖太郎<sup>1)</sup>・阿部 新助<sup>2)</sup>・大塚 勝仁<sup>3)</sup><sup>1)</sup>日本スペースガード協会 <sup>2)</sup>国立台湾中央大学 <sup>3)</sup>東京流星観測網  
Fast Rotation of a sub-km-sized near-Earth object 2011 XA<sub>3</sub>Seitaro URAKAWA<sup>1)</sup>, Shinsuke Abe<sup>2)</sup> and Katsuhito OHTSUKA<sup>3)</sup>

## Abstract

We present lightcurve observations and multiband photometry for a near-Earth object 2011 XA<sub>3</sub>. The lightcurve has shown a periodicity of 43.776 minutes (0.7296 hour). The multiband photometry indicates that the taxonomy class of 2011 XA<sub>3</sub> is C-type or V-type. The estimated diameter is around 170-250m. Therefore, 2011 XA<sub>3</sub> has a probability of the second largest fast rotating asteroid. The fast rotation shows that 2011 XA<sub>3</sub> is in a state of tension and cannot be held together by self-gravitation (so-called, monolithic asteroids). In addition, we calculate the orbital evolution and the D-criterion both (3200) Phaethon and 2011 XA<sub>3</sub>. The orbital evolution calculation cannot identify the both asteroids originate from a same parent body. However, the D-criterion indicates that the 2011 XA<sub>3</sub> has a possibility of the Phaethon-Geminid Complex.

Key Words: Asteroid, Lightcurve, Geminid meteor shower

## 1 Introduction

小惑星の物理特性を明らかにすることは、太陽系形成初期に存在した微惑星の構造や内部強さ、現在に至るまでの衝突進化過程を明らかにするための手がかりとなる。小惑星の物理特性を調べる手法の一つとしてライトカーブ観測がある。小惑星の自転周期や形状は、ライトカーブ観測から明らかになる。これまでのライトカーブ観測から、自転周期が2.2時間より速い小惑星の多くが、直径200m以下の小型の小惑星であることが分かっている<sup>1)</sup>。高速自転小惑星は、遠心力に打ち勝つ事ができる単一岩塊からなる強い構造をとると考えられている(“monolithic asteroids”)。単一岩塊小惑星の自転周期や直径を調べる事で、小惑星の内部強さや構成物質を推定することができる<sup>2)</sup>。一方、自転周期の遅い小惑星は直径数100m以上であり、重力で形状が維持されている。多数の岩塊が弱く重力で結合したラブルパイル構造を取るものも含まれる。

これまで、精度良く自転周期が決定された小惑星のうち2001 OE<sub>34</sub>が、直径700mとsub-kmサイズであるにも関わらず、29.1909分という高速自転をしている<sup>3)</sup>。また、2001 FE<sub>90</sub>が直径200m、自転周期28.66分であるという報告がある<sup>4)</sup>。しかしながら、様々な観測が実施されたにも関わらず、直径200mを超えるような巨大な単一岩塊小惑星は、その後発見されていない<sup>2,5)</sup>。数値シミュレーションにより高速自転小惑星は、その母天

体における衝突現象で生成されると言われている<sup>6)</sup>。また、単一岩塊小惑星の直径と自転周期の関係は、室内実験で生成される衝突破片の直径と自転周期の関係に類似することが示唆されている<sup>7)</sup>。さらに、単一岩塊小惑星の形状は、Hayabusa, Nearの探査で明らかになった、(25143) Itokawaや(433) Erosのボルダー形状と類似している。従って、単一岩塊小惑星は衝突クレーターの放出物や小惑星同士のカタストロフィックな破壊でできた放出物であると考えられている<sup>8)</sup>。ボルダーのサイズ分布は、RosettaやNearによる(21) Lutetia、(433) Erosの探査で明らかになっている<sup>9)</sup>。(21) Lutetiaの場合、ボルダーの最大破片は約300mであり、10の-5乗の冪を持ったサイズ分布となる。しかし、サイズ分布の傾きは直径150m以下で緩やかになり、小さなボルダーの存在数は少ない。同様の傾向は(433) Erosにも見られる<sup>10)</sup>。一方、(25143) Itokawaの最大破片は30m程度と小さく、サイズ分布は10の-3乗の冪と異なる<sup>11)</sup>。(21) Lutetia、(433) Erosのボルダーのサイズ分布が、衝突クレーターが生成する典型的な放出物のサイズ分布と仮定すると、直径150m以下の放出物の一定割合は、母天体である小惑星から脱出したことで、サイズ分布に変化が表れた可能性がある。そのような、放出物が直径200m以下における高速自転小惑星数の増加の原因と考える事ができる。この仮説を確認するには、直径200m以下から1kmサイズに至るまでの

小惑星 (sub-kmサイズ小惑星) にどの程度の高速自転小惑星が存在しているのか、明らかにする必要がある。

本研究の目的は、2011 XA<sub>3</sub>の可視測光観測を実施し、その自転周期、直径、スペクトルタイプを明らかにすることである。2011 XA<sub>3</sub>の絶対等級は20.4等 (Minor Planet Center) であることからsub-kmサイズ小惑星であると考えられる。高速自転をしていれば、2001 OE<sub>54</sub> 以来の極めて希有な大型の単一岩塊小惑星となる。Sub-kmサイズ小惑星の物理特性を明らかにするには、地球接近時に明るくなる地球近傍天体 (NEO: Near Earth Object) の観測が適している。2011 XA<sub>3</sub>は2011年12月15日にPan-STARRS 1で発見されたNEOである。各地の天文台で追観測され、軌道は (a=1.492AU, i=28.3°, e=0.927, Ω=273.5°, ω=323.9°) と推定されている。一方、この軌道は(3200) Phaethonの軌道 (a=1.271AU, i=22.2°, e=0.890, Ω=265.3°, ω=322.1°) と類似しており、小惑星(1555410 = 2005 UD) のような双子座流星群関連天体 (PGC: Phaethon Geminid stream Complex)<sup>12)</sup> の可能性も考えられる。その場合、Phaethonと同様なスペクトルタイプや類似した軌道進化を辿った可能性が考えられる。

本論文では、2章に観測の詳細について記述する。続いて、3章で自転周期、スペクトルタイプ、内部構造の結果について述べる。その後、4章において、(3200) Phaethonとの軌道類似性や、双子座流星群との関連性について議論し、5章で全体をまとめる。

## 2 Observations

我々は美星スペースガードセンター (BSGC) 1m望遠鏡 (f/3) と0.5m望遠鏡 (f/2) を用いて、2011 XA<sub>3</sub>を観測した。観測の詳細を表1、表2に記す。1m望遠鏡の検出器は4096×2048 pixelの4つのCCDからなる。このうち、処理時間短縮のため、一つのCCDを用いた。一つのCCDでの視野は1.14° × 0.57° であり、解像度は1" / pixel である。0.5m望遠鏡にはApogee U42 CCDカメラ (2048 × 2048 pixel) が装着されている。2011年12月16日に1m望遠鏡を用いて位置測定のための観測を行った。画像は市販のWフィルター (490 nm~910 nm) で取得した。ビニングは2×2である。これらのデータはライトカーブの作成にも利用した。続いて、12月19日に、0.5m望遠鏡でのライトカーブ取得と1.0m望遠鏡による多色測光を同じ時間帯に行った。この時はビニングを行っていない。0.5m望遠鏡ではWiフィルター<sup>13)</sup>を用いて120秒積分でデータ取得を行った。1m望遠鏡ではSloan Digital Sky Survey g', r', i', z' フィルターを用いた。それぞれの積分時間は120秒である。1セットの観測は、3枚のg' 画像→3枚のr' 画像→3枚のi' 画像→3枚のz' 画像のように行い、このシーケンスを6回繰り返

した。測光標準星にはSDSS data Release 8<sup>4)</sup>の星を用いた。ライトカーブ及び多色測光の解析手法はIRAFを用いた標準的な手法で行っている<sup>15)</sup>。

表1 観測諸元1

観測日	望遠鏡	積分時間	フィルター
2011/12/16	BSGC 1m	150/120sec	W
2011/12/19	BSGC0.5m	120sec	Wi
2011/12/19	BSGC 1m	120sec	g', r', i', z'

表2 観測諸元2

観測日 [UT]	地心距離 Δ [AU]	日心距離 R [AU]	位相角 α [°]	等級
2011/12/16.5	0.141	1.096	34.9	16.8-17.0
2011/12/19.5	0.081	1.044	40.8	15.8-16.9

\*見かけの等級:2011 XA<sub>3</sub>と同じ視野に撮像されたUCAC2 カタログ星からの推定値

## 3 Results

### 3-1 自転周期と taxonomy

ダブルピークのライトカーブを仮定し、周期解析はLomb-Scargle periodogramで行った<sup>16,17)</sup>。その結果、43.776分の周期を示した。観測時間は2日間と短かったものの、高速自転であったため、複数回以上に同様のライトカーブを検出することに成功した。従って、得られた周期は確かなものである。フィッティング曲線から、その最大振幅は0.63等級である (図1)。次に多色測光の結果を、図2に示す。高速自転であるため、フィルター交換を行う間に光度が著しい変化を起こしている。光度変化量は図1のフィッティング曲線で補正を行った。また、全てのフィルターで観測を実施できた位相は、図1の0.6から0.8の間だけであった。色等級差は、2011 XA<sub>3</sub>がSタイプあるいはVタイプ小惑星であることを示した。2011 XA<sub>3</sub>の絶対等級としてH=20.4等 (Minor Planet Center)、Sタイプのアルベトp<sub>v</sub>=0.20、

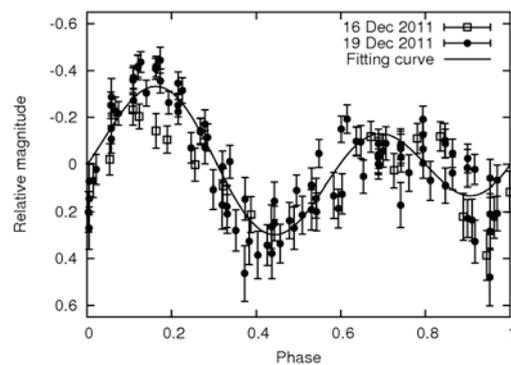


図1 2011 XA<sub>3</sub>のライトカーブ

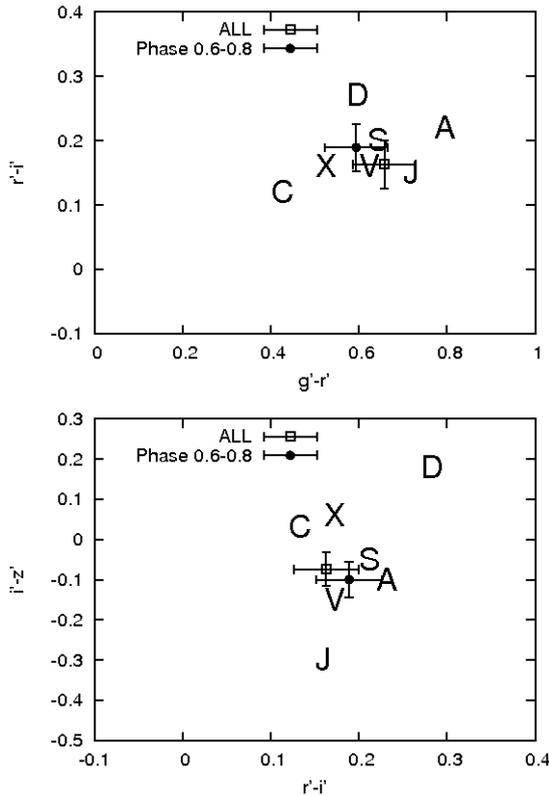


図2 多色測光の結果。図中の文字は小惑星のタイプを示す。ALLは全位相の多色測光データから求めた結果、Phase 0.6-0.8は図1の位相0.6-0.8の間に取得したデータから求めた結果である。

Vタイプのアルベト $p_v=0.40$ を仮定したとき、

$$D=1329\text{km} \times 10^{-H/5} p_v^{-1/2} \quad (1)$$

より、その直径Dは170m~250mとなる。従って、2011 XA<sub>3</sub>は、2001 OE<sub>34</sub>に次ぐ巨大な高速自転小惑星の可能性が高い。

### 3-2 形状と構造

ライトカーブの振幅と位相角 $\alpha$ には以下のような関係がある<sup>18)</sup>。

$$A(0)=A(\alpha)/(1+m\alpha) \quad (3)$$

ここでA(0)は位相角0°の時の振幅である。mは小惑星のスペクトルタイプに依存する係数であり、Sタイプ小惑星の場合0.03である。また、観測時に小惑星を赤道面方向から見ていると仮定すると、小惑星の軸比と光度振幅は次の関係がある。

$$A(0)=2.5 \log(a/b) \quad (4)$$

ここで、小惑星の長軸がa、短軸がbである。2011 XA<sub>3</sub>の振幅A(0)は0.63等級であり、これらのライトカーブデータの大半は位相角40°付近で得られた。従って、a:b=1.3:1となる。また、2011 XA<sub>3</sub>が重力で形状が維持されている小惑星であると仮定するとき、その $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]は、

$$\rho=(3.3h/P)^2(1+A) \quad (5)$$

で表される<sup>1)</sup>。ここでPは自転周期[h]である。2011 XA<sub>3</sub>の場合、 $\rho$ は26.3[g/cm<sup>3</sup>]となり、明らかに小惑星を構成する物質と異なる。従って、2011 XA<sub>3</sub>は重力で形状が維持されていない、単一岩塊構造をとる高速自転小惑星である。小惑星が単一岩塊構造を取るとき、その限界周期と直径の関係は以下の式で表せる<sup>2)</sup>。

$$P=(7.3 \times 10^{-1/4}/C)(\rho/\kappa)^{1/2}D^{5/4} \quad (6)$$

ここでCは形状と摩擦角に依存する係数である<sup>19)</sup>。 $\kappa$ は引張り強度係数[Nm<sup>-3/2</sup>]、Dは直径[km]である。今、2011 XA<sub>3</sub>の軸比をa:b:c=1.3:1:1(cは自転軸)、摩擦角を40°と仮定すると、PとDの関係は $\rho$ と $\kappa$ に依存して、図3のようになる。2011 XA<sub>3</sub>は小惑星を構成する物質に典型的な $\kappa$ 、 $\rho$ の組み合わせに対して、十分その形状が維持可能であることが分かる。この結果は、2011XA<sub>3</sub>が単一岩塊構造を取ることにより強く証明する結果となる。

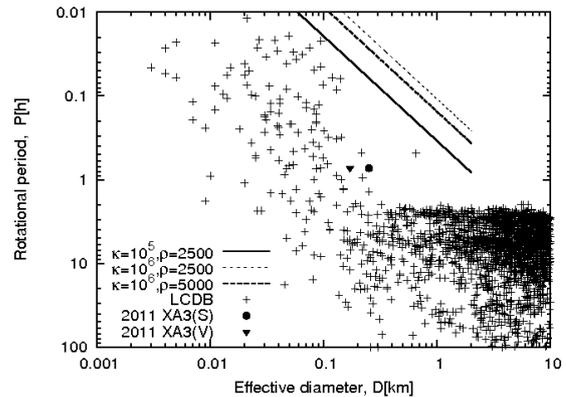


図3 小惑星の自転周期Pと直径Dの関係。直線が小惑星に典型的な様々な $\kappa$ と $\rho$ に対する限界周期を表す。LCDBはLightcurve Databaseで公開されている小惑星の自転周期と直径を示す。丸印と逆三角印は、それぞれSタイプ、Vタイプを仮定した時の2011 XA<sub>3</sub>の直径を示す。

### 4 Discussions

2011 XA<sub>3</sub>と(3200) Phaethonの軌道関係性を評価するために両天体の軌道計算を、post-Newtonian方程式を用い、Bulirsch-Stoer法で行った。計算範囲は2012年3月14日から前後30000年の範囲である。また、これまで明らかになった、それぞれの天体の軌道要素の誤差1 $\sigma$ の範囲にクローン243個を分配し、その軌道を追っている。太陽や惑星の位置情報はJPL DE/LE406を用いた。結果を図4に示す。図4が示すように両天体とも古在機構下<sup>20)</sup>にあり、2011 XA<sub>3</sub>と(3200) Phaethonのそれぞれの近日点引数に29000年と37000年の周期がある。また、近日点距離が0.1AU以下になる時期があり、過去に強い

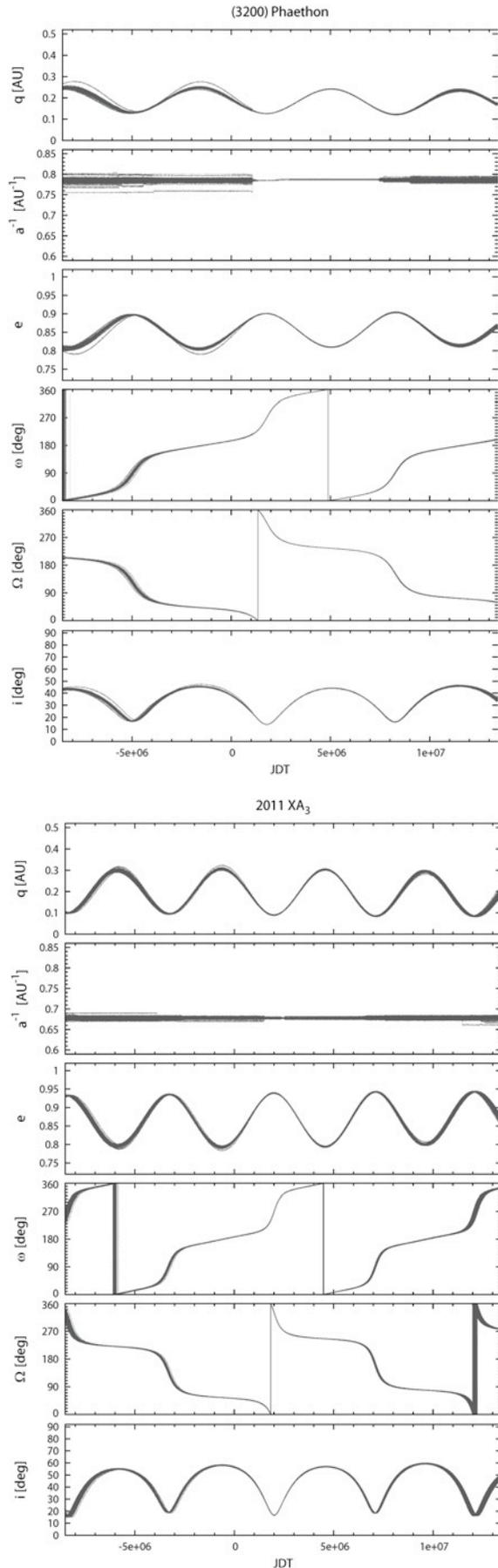


図 4. 2011XA<sub>3</sub> と (3200)Phaethon の軌道進化

熱変成を受けたことを示唆している。しかしながら、両天体の軌道が重なる時期や、時間軸をシフトさせても、軌道は一致せず、この結果からは両天体が同一起源であるとは言えなかった。次に、2011XA<sub>3</sub>が双子座流星群関連天体(PGC)であるか調査するためD-criterionを用いて、軌道の類似性を議論する。D-criterionは以下の式で定義される<sup>21)</sup>。

$$[D_{sh}(A, B)]^2 = [e_b - e_a]^2 + [q_b - q_a]^2 + [2\sin(i_b - i_a)/2]^2 + \sin i_a \sin i_b [2\sin((\Omega_b - \Omega_a)/2)]^2 + [((e_a + e_b)/2) 2\sin((\omega_b + \omega_a) - (\Omega_a + \omega_a)/2)]^2 \quad (7)$$

ここで、下付き文字bで示したのが(3200) Phaethonの軌道要素であり、下付き文字aで示したのが2011 XA<sub>3</sub>を含む既知の9254個のNEOの軌道要素である。結果を図5に示す。図5において、(D<sub>sh</sub>, Cumulative number) = (0, 1)が(3200)Phaethonの位置を示す。実線は10<Cumulative number<1000の間でのフィッティング直線を示し、その冪は5.5となる。2011 XA<sub>3</sub>は(0.198, 2)にプロットされている。明らかにフィッティング直線から離れており、他のNEOと比較してPGCである可能性が高い。ただし、 $\sqrt{(1-e^2)} \times \cos(i)$ が保存される古在機構下においては、D<sub>sh</sub>が周期的に変化を起こし、偶然D<sub>sh</sub>が小さくなる可能性がある。従って、この結果だけから(3200)Phaethonと2011 XA<sub>3</sub>が同一母天体由来の天体であると断定する事はできない。特に、(3200)PhaethonがBタイプ小惑星の特徴を示す天体であるのに対し、2011 XA<sub>3</sub>はSあるいはVタイプの小惑星であり組成が一致しない。しかしながら、少なくとも現在の軌道においてはPGCと思われる軌道要素を有している。2011 XA<sub>3</sub>は、過去に(3200)Phaethonと衝突を起こしたインパクトターであり、その衝突現象でまき散らされたダストが双子座流星群の起源となっているのかもしれない。

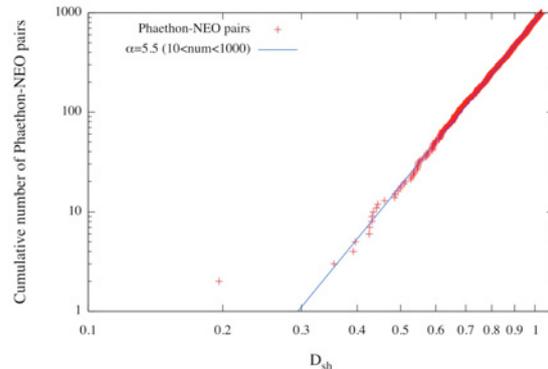


図5 (3200) Phaethonに対する、既知のNEOのD<sub>sh</sub>。D<sub>sh</sub>=0.2付近にプロットされているのが2011 XA<sub>3</sub>

### 5 Summary

本研究で、地球近傍小惑星2011 XA<sub>3</sub>の可視測光観測を行った。その結果、自転周期43.776分の高速自転小惑星であることが明らかになった。また、多色測光の

結果、S、あるいはVタイプの小惑星であることが判明した。S、Vタイプに典型的なアルベドを仮定したとき、その直径は170-250mであった。地球近傍小惑星はSタイプの可能性が高く、Sタイプであれば、これまで観測された高速自転小惑星のうち2番目の大きさとなる。本研究で明らかにした、自転周期と直径から2011 XA<sub>3</sub>は、単一岩塊構造をした小惑星であることは明らかである。さらに、2011XA<sub>3</sub>と(3200)Phaethonの軌道類似性について、軌道進化シミュレーションとD-criterionを用いて議論を行った。この結果から、2011 XA<sub>3</sub>と(3200)Phaethonが同一起源天体であるという確証には至らなかった。しかしながら、現在の軌道には類似性があり、PGCである可能性がある。

本研究から、これまで発見がほとんどなかった、sub-kmサイズの高速自転小惑星の存在が明らかになった。一方、もっとも巨大な高速自転小惑星である2001 OE<sub>84</sub>の直径700mとの間には差があり、sub-kmサイズの高速自転小惑星の存在の普遍性やサイズ分布は未だに不明な点が多い。Sub-kmサイズの高速自転周期小惑星を検出するには、本研究のように、sub-kmサイズNEOの発見直後に、観測好機を逃す事なく、観測を実施することが重要である。今後も、引き続きこのような天体に対して観測を実施することで、sub-kmサイズの高速自転小惑星の存在数やサイズ分布について統計的な議論が可能になる。

#### 参考文献

- 1) Pravec, P., & Harris, A. W., 2000. Fast and Slow Rotation of Asteroid. *Icarus* 148, 12-20
- 2) Kwiatkowski, T. et al., 2010. Photometric Survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope III. Lightcurves and periods for 12 objects and negative detections. *A&A* 511, A49
- 3) Pravec, P. et al., 2002. Large coherent asteroid 2001 OE<sub>84</sub>. In: *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2002. International Conference, Berlin, Germany.*
- 4) Hicks, M., Lawrence, K., Rhoades, H., Somers, J., McAuley, A., Barajas, T., 2009. 2001 FE90: An elongated and rapidly rotating near-Earth asteroid. *The Astronomer's Telegram*, 2116, 1
- 5) Kwiatkowski, T., et al., 2010b. Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope. I. Lightcurves and periods for 14 objects. *A&A*, 509, A94
- 6) Asphaug, E., Scheeres, D. J., 1999. Deconstructing Castalia: Evaluating a postimpact state. *Icarus* 139, 383-386
- 7) Kadono, T., Arakawa, M., Ito, T., Ohtsuki, K., 2009. Spin rates of fast-rotating asteroids and fragment in impact disruption. *Icarus* 200, 694-697
- 8) Michikami, T., Nakamura, A., Hirata, N., 2010. The shape distribution of boulders on Asteroid 25143 Itokawa: Comparison with fragments from impact experiments. *Icarus* 207, 277-2847
- 9) Küppers, M. et al., 2012. Boulders on Lutetia. *Planetary and Space Science* 66, 71-78
- 10) Thomas, P.C., Veverka, J., Robinson, M.S., Murchie, S., 2001. Shoemaker crater as the source of most ejecta blocks on the asteroid 433 Eros, *Nature* 413, 394-396
- 11) Michikami, T. et al., 2008. Size-frequency statistics of boulders on global surface of asteroid 25143 Itokawa. *Earth, Planets and Space* 60, 13-20
- 12) Ohtsuka, K., Sekiguchi, T., Kinoshita, D., Watanabe, J.-I., Ito, T., Arakida, H., Kasuga, T., 2006. Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon? *A&A* 450, L25-L28
- 13) Okumura, S., Nishiyama, K., Urakawa, S., Sakamoto, T., Takahashi, N., Yoshikawa, M., 2012. Wide-Band Optical Filter Optimized for Deep Imaging of Small Solar System Bodies. *PASJ* 64, No. 47 (6 pages)
- 14) Aihara, H. et al., 2011. The Eight Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III. *Astrophys. J. Supplement* 193, id29(17. pp)
- 15) Urakawa, S. et al., 2011. Photometric observations of 107P/Wilson-Harrington. *Icarus* 215, 17-26
- 16) Lomb, N.R., 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. Space Sci* 39, 447-462
- 17) Scargle, D.J., 1982. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *AJ* 263, 835-853
- 18) Zappala, V., et al., 1990. An analysis of the amplitude-phase relationship among asteroids. *A&A* 231, 548-560
- 19) Holsapple, K.A., 2007. Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61. *Icarus* 187, 500-509

- 20) Kozai, Y., 1962. Secular Perturbations of Asteroids with High and Eccentricity. AJ 67, 591-598
- 21) Southworth, R. B., & Hawkins, G. S., 1963. Statics of meteor streams. Smithsonian Contributions of Astrophysics 7, 261-285

(2012年12月30日受付, 2013年1月15日受理)