

(162173) 1999 JU3の国際キャンペーン測光観測

International Campaign of (162173)1999 JU3 Lightcurve Observation

黒田大介¹⁾ 石黒正晃²⁾・長谷川直³⁾ Hayabusa 2 地上観測グループ¹⁾ 国立天文台 ²⁾ ソウル大学 ³⁾ JAXADaisuke KURODA¹⁾, Masateru ISHIGURO²⁾, Sunao HASEGAWA³⁾,
and Hayabusa 2 Ground-Based Observation Sub-group

Abstract

We contrived the international campaign observation of Hayabusa 2 target asteroid (162173) 1999 JU3 to determine the physical parameters of the asteroid. As the results, we obtained the lightcurve data with 12 telescopes. It is found that the absolute magnitude and G-parameter of 1999 JU3 is 18.82 ± 0.02 and 0.077 ± 0.060 , respectively. With the mid-infrared data, it results in the geometric albedo of 0.058 ± 0.007 . The remaining work is the determination of the pole orientation.

Key Words: Hayabusa 2, 1999 JU3, Lightcurve

1 はじめに

(162173) 1999 JU3 (以下1999 JU3) は、Hayabusa 2 探査候補天体です。Hayabusa 2は、Hayabusa初号機が探査したS型小惑星とは異なるタイプの小惑星からのサンプルリターンを目指しています。1999 JU3の物理特性は、2007-2008年の観測データを用いて推定されていました。2011-2012年に17等台まで明るくなり、中口径望遠鏡を用いてライトカーブ観測が可能になりました。今回の観測好機は、Hayabusa 2探査機打ち上げ前の最後の観測好機です。本研究グループは、この観測機会に、国際観測キャンペーンを実施し、世界中の研究者と協力して、その自転周期や絶対等級の推定を行いましたので、ここに報告します。

2 観測

観測に用いた望遠鏡は以下の通りです。

表1. 観測所一覧

観測所	口径(m)	波長
IRSF (南アフリカ)	1.4	JHK
MOA-I (ニュージーランド)	1.8	R
西はりま天文台 (日本)	2.0	R
Himarayan Chandra (インド)	2.0	R
Tenagra II (アメリカ)	0.8	R
Bosque Alegre (アルゼンチン)	1.5	R
Magellan Baade	6.5	R
Lulin (台湾)	1.0	R
Univ. Hawaii (アメリカ)	2.2	$R/r' / g$
Calar Alto	1.2	r

Tubitak Ulusal Gozlemevi	1.0	R
ESO/MPI (チリ)	2.2	$g' r' i' z'$ JHK

世界各地にある12カ所の天文台で、可視CCDカメラまたは近赤外線カメラを用いた太陽光反射成分の測光観測を実施しました。観測データは、Hayabusa 2地上観測グループが一括して管理し、専門家に依頼して高度な解析(例：形状モデル)を行っています。

図1は、2007年1月から2015年12月末までの、可視等級(上段)、赤緯(中段)、太陽位相角(下段)を表しています。

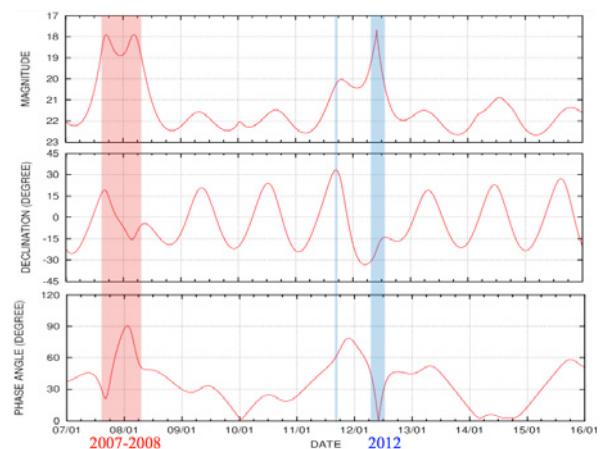


図1 可視等級(上段)、赤緯(中段)、太陽位相角(下段)の時間変化

中小口径（1-2m級）望遠鏡でライトカーブデータを取得できる明るさは、約20等より明るい天体です。図1上から、Hayabusa 2探査機が打ち上がる直前の観測好機は、2007-2008年と、2011-2012年の2回あることがわかります。ただ、2011-2012年の観測好機は、観測できる期間が短いことがわかります。2007-2008年では、長期間にわたり19等よりも明るかったので、1mクラスの望遠鏡でも観測することができました。2011-2012年の観測好機では、もっとも明るくなる2012年5月頃は北半球から観測することが困難で、南半球や低緯度帯の観測時間を有する研究者や研究機関との連携が不可欠でした。2011-2012年の観測好機は、2007-2008年に観測することができなかった低位相角での観測を実現することができました。この観測データは、後述の通り、絶対等級やアルベドの推定に役立っています。

図2は、1999 JU3の観測時のPAB (Phase-Angle Bisector)を表しています。PABとは、小惑星を中心とした、太陽方向と地球方向によって決定される角度です。PABに向けている面積が最小の時、小惑星の等級は最大になり、PABに向けている面積が最大の時、小惑星の等級は最小になります。PABは、小惑星の太陽光照射条件を表すパラメーターであり、一般に、広いPABにおけるライトカーブデータを取得することによって、より正確に自転軸の向きや形状モデルを構築できると考えられています。

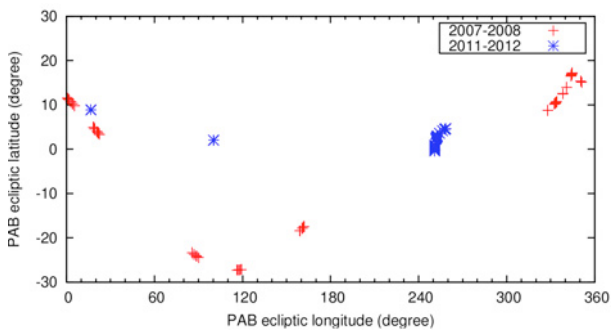


図2 1999 JU3の観測時のPAB

図2から、2011-2012の観測好機では、前回観測できなかった黄経250° 付近のデータが追加されたことになります。今観測好機での観測データが追加されたことによって、ほぼ全経度方向からの観測データがそろったことになります。

3 等級の位相角依存性と絶対等級

図3は、1999 JU3の等級（太陽から1天文単位、観測者から1天文単位の等級に換算）の位相角（太陽—小惑星—地球のなす角）依存性を示しています。各観測値は、異なるフィルターシステムを用いているため、Vバンドの値に換算して表示しています。また、ここでは、偶然誤差だけを考慮し、波長変換に関する系統誤差は無視しています。

星—地球のなす角）依存性を示しています。各観測値は、異なるフィルターシステムを用いているため、Vバンドの値に換算して表示しています。また、ここでは、偶然誤差だけを考慮し、波長変換に関する系統誤差は無視しています。

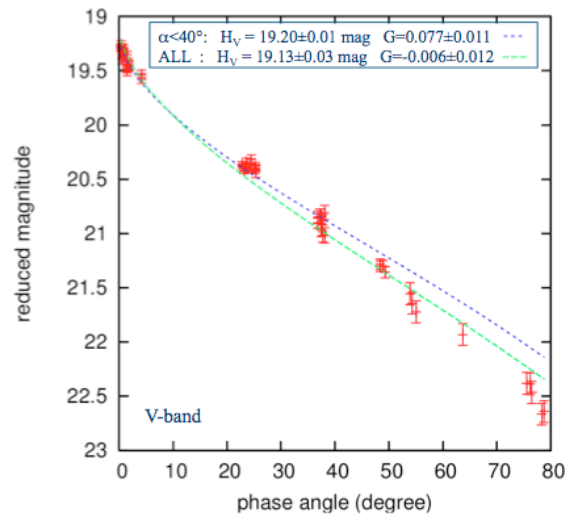


図3 等級の太陽位相角依存性 破線は、IAU HGによるフィティング曲線。緑はすべての位相角のデータを、青は位相角40° 以下のデータを用いて得られたものである。

2012年5月末から6月上旬にかけて、低位相角（最小0.3°）で観測することができたため、先攻研究よりも正確に絶対等級 H_V （太陽から1天文単位、観測者から1天文単位、位相角ゼロ度の等級）を調べることができます。位相曲線を再現するために、IAU H_V - G 関数を用いました。この関数は、本来、メインベルト小惑星の等級の波長依存性を再現するために経験的に提唱されたものです(see e.g. Limme et al. 1984)。図3の上側の線は位相角40° 以下のデータから H_V と G パラメーターを調べたものです。図3の下側の線は、すべての観測データ(位相角0.3-85.7°)を用いて、 H_V と G パラメーターを推定したものです。 H_V と G パラメーターは、低位相角で観測されるメインベルトの小惑星に対して調べられてきたものなので、他の地球近傍小惑星(例えば Itokawa (Bernardi et al. 2009) や Wilson-Harrington (Ishiguro et al. 2011))において、位相角約60° 以上のデータは、IAU H_V - G 関数から著しくずれています。本研究では、低位相角だけを用いた前者の値を採用することにしました。

上に述べたように、これまで H_V と G パラメーターの推定において、波長間の等級変換によって生じる系統誤差を考慮していません。特に、位相角ゼロ度付近の

データは、J-band(近赤外波長域)でのデータであるので、V-band等級に変換する際、系統誤差が生じます。J-bandとV-band(可視波長域)での太陽類似星の色指数には、いくつかのリファレンス論文が存在し、引用する論文によって我々の結果が異なります。したがって、 H_V は0.12等、Gパラメーターは0.060の系統誤差があるものと考えられます。

以上から、絶対等級 H_V とGパラメーターは、それぞれ 19.20 ± 0.12 (Vバンド換算)と 0.077 ± 0.060 と結論づけることができます。Gパラメーターは、通常正の値を示します。Kawakami (2009)では、負のGパラメーターを示しましたが、本研究では、他のC型小惑星と整合する値が得られました。

4 会合自転周期

小惑星の見かけ等級の時間変化(ライトカーブ)の周期性から、自転周期を推定することが可能です。ここで述べる自転周期は、観測者からの見かけの自転周期(会合周期)を意味します。自転周期を推定するにあたり、Fourier変換によるパワースペクトルや、Fast χ^2 法(Palmer 2009)などが用いられます。いずれも、単純な形状の小惑星の自転周期を調べるのに有用です。図4上は、2007-2008年の、図4下は2007-2012年のライトカーブのパワースペクトルです。2011-2012年のデータが加わったことによって、最大値がより顕著になりました(矢印部)。この結果、自転周期は7.629時間だと推定することができます。ただし、この値は、小惑星のライトカーブが2つの極大値と極小値を持っていることを前提としています。つまり、1/2周期や2倍周期をもったライトカーブである可能性は否定することができません。しかしながら、中間赤外フラックスを説明するための、熱モデル計算では、1/2周期や2倍周期では観測値との差が大きいことから、この可能性を否定することができました。

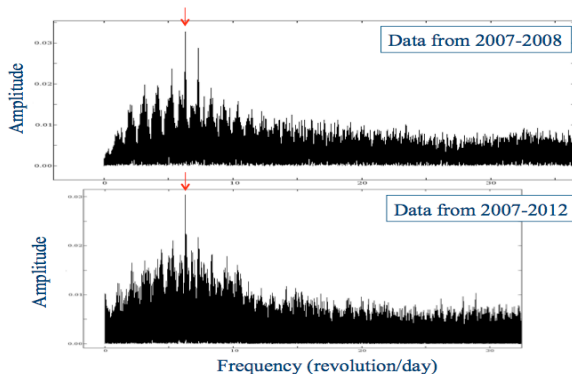


図5 1999 JU3のライトカーブのパワースペクトル (Kim et al. 2013, A&A Letter査読中)

図6は、自転周期7.629時間で折り返したライトカーブです。ほとんどの測光値は振幅0.1等以内におさまっています。図6において、一部、大きな振幅を示すデータ点が存在します。この観測とほぼ同時期に観測したライトカーブの振幅は0.1等以内であることから、これらのデータは補正できていない系統誤差を含んでいると考えられます。

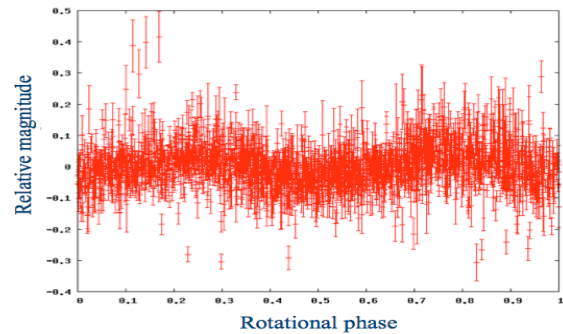


図6 周期7.628時間で折り返した1999 JU3の2007-2012年のライトカーブ

5 現在進行中の研究

本キャンペーンによって得られたライトカーブを元に、現在、自転軸と形状の推定を行っています。ライトカーブの振幅が、通常の小惑星と比較して、著しく小さいことから、自転軸の決定は容易ではありません。熱モデルと組み合わせることによって、可能性の高い自転軸の向きを決定できるよう取り組んでいます。

6 まとめ

表2に、本キャンペーン観測によって得られた1999 JU3の物理量をまとめます。ここには、本報告では説明していない熱モデル計算結果も示しています。

参考文献

1. Müller, T., et al. 2011, A&A 525, A145
2. Kawakami, K. 2009, 修士論文, 東京
3. Campins, H, Emery, J. P. et al. 2009 A&A 503, L17
4. Hasegawa, S, et al. 2008, PASJ 60, SP2, S399-S405
5. Lumme, K. et al., BAAS, 16, 684, 1984
6. Ishiguro, M. et al. ApJ 726, 2, 10, 2011

7. Bernardi, F. et al. MAPS 44, 12, 1849, 2009

表 2 1999 JU3 の物理特性

	先攻研究	本報告
直径 [km]	0.87 ± 0.03 ^{(*)1} 0.90 ± 0.14 ^{(*)3} 0.92 ± 0.12 ^{(*)4}	0.825 ± 0.025
ジオメトリックアルベド	0.07 ± 0.006 ^{(*)1} ^{(*)4} 0.07 ± 0.01 ^{(*)3} 0.063 ^{+0.020} _{-0.015} ^{(*)4}	0.058 ± 0.007
熱慣性 [J m ⁻² s ^{-0.5} k ⁻¹]	200-600 ^{(*)1} 700 ± 200 ^{(*)3}	200 ± 100
自転周期 [時間]	7.63 ± 0.01 ^{(*)1} 7.627 ^{(*)2}	7.631 ± 0.002 (LC-inversion) ½倍, 2倍周期の可能性低い
G パラメーター	-0.110 ± 0.007 ^{(*)1}	0.077 ± 0.060
H ₀ [V-band 等級]	18.82 ± 0.02 ^{(*)2}	19.20 ± 0.12

*1: Müller, T., Āurech, J. et al. 2011, A&A 525, A145

*2: Kawakami, K. 2009, 修士論文, 東京大学理学系研究科

*3: Campins, H, Emery, J. P. et al. 2009, A&A 503, L17

*4: Hasegawa, S, Müller, T. et al. 2008, PASJ 60, SP2, S399-S405

(2012年12月27日受付, 2013年1月15日受理)