

Photometric Observations of 107P/(4015) Wilson-Harrington

浦川 聖太郎¹⁾・奥村 真一郎¹⁾・西山 広太¹⁾・坂本 強¹⁾・高橋 典嗣¹⁾・
石黒 正晃²⁾・北里 宏平³⁾・黒田 大介⁴⁾・長谷川 直⁵⁾・吉川 真⁵⁾

¹⁾ 日本スペースガード協会 ²⁾ ソウル大学 ³⁾ 会津大学 ⁴⁾ 国立天文台 ⁵⁾ JAXA

Photometric Observations of 107P/(4015) Wilson-Harrington

Seitaro URAKAWA¹⁾, Sin-ichiro OKUMURA¹⁾, Kota NISHIYAMA¹⁾, Tsuyoshi SAKAMOTO¹⁾,
Noritsugu TAKAHASHI¹⁾, Masateru ISHIGURO²⁾, Kohei KITAZATO³⁾, Daisuke KURODA⁴⁾,
Sunao HASEGAWA⁵⁾, and Makoto YOSHIKAWA⁵⁾

Abstract

We present the rotational states of 107P/(4015) Wilson-Harrington. 107P/(4015) Wilson-Harrington is a comet-asteroid transition object, and a promising a candidate to be explored by an advanced spacecraft Hayabusa-Mk2. The physical properties of W-H allow us to infer the origin and evolution of NEO, or the relationship between asteroids and comets. The photometric observations of light variation, so-called lightcurve, make clear the physical properties. In addition, the physical properties of 107P/(4015) Wilson-Harrington are important to design the future mission plan. We have conducted the ground-based observation campaign of 107P/(4015) Wilson-Harrington by using five small and medium-sized telescopes.

Key Words: Asteroid, Comet, Lightcurve

1 107P/(4015) Wilson-Harrington

小惑星や彗星は、太陽系形成時の様子や、現在に至るまでの進化の情報を留めた始原天体である。これらの天体の自転状態や形状は、衝突合体の進化過程を反映したものである。また、構成する物質は化学進化過程を反映したものである。小惑星は主に岩石物質からなる天体であり、彗星は岩石物質に加え、揮発性物質を豊富に含んだ天体であると考えられている。一方、彗星と小惑星の特性を兼ね備えたような天体(彗星・小惑星遷移天体)も存在している。小惑星(2201)Oljatoと小惑星(3200)Phaethonは、それぞれおうし座流星群複合体、ふたご座流星群の母天体と考えられており、かつて彗星活動をしていたことが指摘されている^{1,2)}。これらの天体は、木星族彗星(Jupiter Family Comet: JFC)が、揮発性物質の放出を終えて枯渇彗星核となった地球近傍小惑星(Near Earth Object: NEO)ではないかという説がある。一方、軌道の観点から考えると、Tisserandパラメーターはいずれの天体も3を超えており、木星族彗星(Jupiter Family Comet: JFC)に分類されない。さらに、過去に遡った軌道計算においても、これらの天体の起源はJFCではなく、小惑星帯(Main Belt Asteroid: MBA)の外側に、その起源があることが指摘されている³⁾。

また、最近ではMBA領域で彗星活動を起こす天体が発見されている。これらは、メインベルト彗星(Main Belt Comet: MBC)⁴⁾と言ひ、これまで7天体が発見され

ている。代表的な例として、133P/Elst-Pizarro、P/2010A2(LINEAR)、P/2005U1(Read)、176P/LINEAR、小惑星(596)Scheilaがある。これらの天体が、彗星活動を起こす原因の一つとして、他天体衝突の可能性が考えられている⁵⁾。また、133P/Elst-PizarroをはじめMBCのスペクトル型はB型やそのサブタイプであるF型を示すものが多い。B型小惑星は、小惑星(2)Pallasや小惑星(24)Themis、また、それらと族をなす小惑星によく見られる。特に、133P/Elst-Pizarro、176P/LINEAR、P/2005U1(Read)はThemis族として形成されたという報告がある⁶⁾。B型小惑星の特徴として、やや青みかかったスペクトルをしており、水質変成を起こした鉱物の存在を示唆している^{7,8)}。このように、彗星・小惑星遷移天体を研究することは、NEOの起源や進化、小天体同士の衝突、太陽系形成時における微惑星の物質組成、地球の水の起源といった太陽系形成過程の諸問題を解き明かすための手がかりとなる。

小惑星・彗星遷移天体のひとつに、107P/(4015) Wilson-Harrington(以下W-H)がある。W-Hは、1949年の発見時に淡い尾が検出され、彗星として107Pの番号がつけられた。発見時の観測数が多くなかったため、正確な軌道を算出するには至らなかったが、1979年に検出された地球近傍小惑星1979VAがW-Hと同一天体であることが判明し、小惑星番号4015がつけられた。従って、W-Hは、(2201)Oljatoや(3200)Phaethonと同様、

かつて彗星活動を行っていた天体と考えられている⁹⁾。その後は、彗星活動は見られず、2009/2010年の観測においても、W-Hに顕著な彗星活動が見られなかったと報告されている¹⁰⁾。W-Hは軌道長半径 $a=2.639$ AU、軌道離心率 $e=0.624$ 、軌道傾斜角 $i=2.785^\circ$ を持ったアポロ群NEOである。また、Tisserandパラメーターは3.084であり、JFCに分類されない。その起源は、4%の確率でJFCにあり、65%の確率でMBAの外側にあると報告されている³⁾。スペクトルタイプはC型小惑星やF型小惑星の特徴を持つと考えられている^{11,12)}。このようなことから、MBAの外側に起源を持ち、水質変成を受けたような始原天体である可能性がある。さらに、W-Hは、その軌道の特徴から探査機による探査に適した天体であり、はやぶさ、はやぶさ2に続く探査機計画の候補天体のひとつである¹³⁾。このような天体を詳細に観測することは、将来の探査計画の策定のためにも重要である。

本研究で、我々は、W-Hの自転状態や形状の調査を行った。また、多色測光により表面カラーの均一性についても調査を行った。W-Hの彗星活動の原因が、MBCに見られるような他天体衝突によるものであれば、その自転になんらかの衝突の影響が残っている可能性がある。また、その表面カラーに不均一性が生じている可能性も考えられる。これまで、W-Hの自転は、3.226時間と6.2時間という二つの異なる報告がなされている^{14,15)}。しかし、ともに数日程度の観測から求めたものであり、観測は十分ではない。また、自転の方向、自転軸方向、形状については詳しく調べられていない。これらの物理状態を解明するには、長期間に及ぶ測光観測からW-Hのライトカーブを取得する必要がある。我々は、国内外の中小口径望遠鏡を用いて、長期測光観測キャンペーンを実施した。本稿では、その結果について報告する。

2 観測

ライトカーブ取得のための観測は、2009年8月から2010年3月にかけて、美星スペースガードセンター(BSGC)1m望遠鏡、岡山天体物理観測所(OAO)0.5m望遠鏡、ルーリン天文台1m望遠鏡、木曾観測所1.05m望遠鏡、ハワイ大学2.2m望遠鏡を用いて行った。画像の一次処理の後、相対測光を行い、ライトカーブを得た。また、2009年12月17日に、BSGCとOAOで多色測光観測も実施した。BSGCでは g^r 、 r^i 、 i^z フィルターを用い、OAOでは g^r 、 R 、 I フィルターを用いた。

3 結果

得られたライトカーブからLomb-Scargle法¹⁶⁾により、周期解析を実施し、W-Hの自転周期を求めた(図1)。図

1のように、3つの周期解析解の候補が求まり、そこから0.2979日(=7.15 \pm 0.01時間)をW-Hの自転周期とした。候補のうち0.2542日は、過去の研究¹⁴⁾において報告があった自転周期と矛盾するものであったので候補から除外した。また、0.0993日は後で述べる歳差運動の周期の可能性があるため、自転周期の候補から除外した。さらに、過去に報告があった二つの自転周期は、0.2979日にも周期解析解があり、本研究の結果と矛盾しない。図2に、0.2979日で折り畳んだライトカーブを示す。通常の小惑星ライトカーブと異なり、ピークが6回表れる特徴的なライトカーブである。次に、自転軸の方向をエポック法¹⁷⁾とカサライネンモデル法¹⁸⁾により求めた。このうち、一例としてエポック法の仕組みを述べ、その結果を図3に示す。本研究のように、長期間の観測を実施した場合、太陽、地球、W-Hの位置関係の変化により、ライトカーブの位相にズレが生じてくる。この位相のズレの大きさは、自転軸の方向に依存する。そこで、観測から得られるライトカーブの位相のズレと、自転軸の方向に応じて理論的に求まる位相のズレを比較し、その差分が最も小さくなる値から、理論的な自転軸を算出する。このように自転軸を決定する方法がエポック法である。図3で示されるように、エポック法では自転軸方向を一つに決定することは難しい。本研究では、自転軸A(黄経310° 黄緯-10°)と自転軸B(黄経132° 黄緯-17°)付近が最も確からしい自転軸の方向となった。また、カサライネンモデル法では、自転軸C(黄経330° 黄緯-27°)付近が最も確からしい自転軸方向となった。

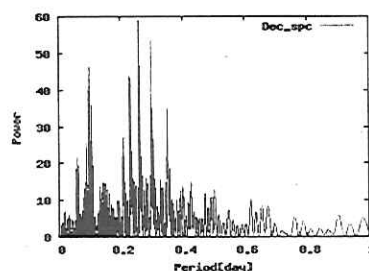


図1. 周期解析の結果。0.2542日、0.2979日、0.0993日付近に有意な周期がある。

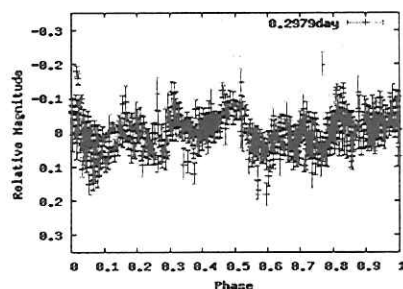


図2. 0.2979日で折り畳んだライトカーブ

形状モデルは、得られた自転周期と自転軸方向を初期値としてカサライネンモデル法で求める。カサライネンモデル法は、小惑星形状を楕円体でモデル化し、モデル表面での光の散乱特性を計算することで得られる仮想的なライトカーブと、観測から得られたライトカーブを比較することで小惑星形状を再現する方法である。自転軸Aと自転軸Cから得られた形状モデルA、Cをそれぞれ図4、図5に示す。自転軸Bを初期値にしたモデルは、自転軸Aを初期値にしたモデルとほぼ同様

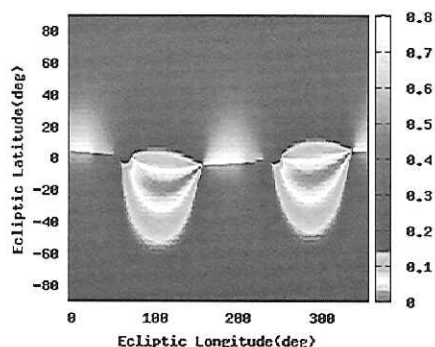


図3. 観測から得られたライトカーブの位相ズレと理論的に求めた位相ズレの差分。自転軸方向を1°刻みで、黄経方向に0°~360°、黄緯方向に-90°~+90°の範囲で探索し、最も確からしい自転軸方向を求めた。

なものとなったので、ここでは割愛する。形状モデルAの三軸比、L1:L2:L3は1.0:1.0:1.6となる。ここでL3が自転軸である。このモデルのように自転軸が他の2軸より長くなる形状はkmサイズの小惑星では例がない。一方、彗星の場合はこのような例が考えられる。また、自転周期を0.2979日、歳差周期を0.0993日とし、W-Hを剛体と仮定した時、W-Hの自転軸は、全回転角運動量ベクトル方向から65°傾いて回転していることとなる(章動角)。一方、形状モデルCの三軸比、L1:L2:L3は1.5:1.5:1.0となる。このような形状は小惑星で比較的良好にみられる形状である。形状モデルAと同様に歳差運動を仮定し、その運動を調べたが、形状モデルCの三軸比と自転周期、歳差周期を満たす解はなかった。従って、この形状モデルでは通常の小惑星のように、自転軸方向と全回転角運動量ベクトルの方向が一致しているものと考えられる。

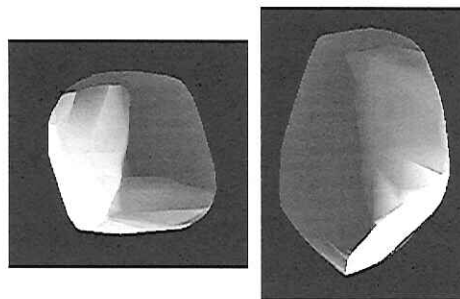


図4. 形状モデルA。(左)自転軸方向からの俯瞰。(右)水平方向からの俯瞰

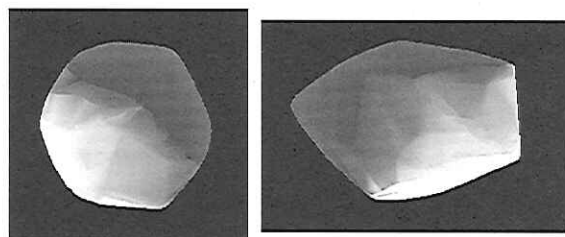


図5. 形状モデルC。(左)自転軸方向からの俯瞰。(右)水平方向からの俯瞰

図6に多色測光の結果を示す。各フィルターで得られた観測値を2色図にプロットすることで、W-Hのスペクトルタイプとその時間変化を調査した。R、Iの各等級は、文献を参考にr'、i'等級に変換している¹⁹⁾。多色測光では、分光観測と比較して詳細な小惑星の分類を行うことは難しい。B型やF型小惑星は、図6中では、ほぼC型小惑星の位置にプロットされる。本研究の結果は、W-Hがやや赤みがかったC型小惑星であることを示している。特に、図6(上)でのPhase-3と図6(下)のPhase-4、7の値はX型を示唆しており、W-Hの表面に何らかの不均一性がある可能性を示している。ただし、本観測における測光精度は典型的に±0.1等程度であり、不均一性の明確な判定や、わずかな赤みが実際に起こっているのか判定することは困難である。OAOでの分光観測では、典型的なC型小惑星の兆候を示すデータが得られている¹⁰⁾。X型小惑星は、Tholen分類ではE、M、P型小惑星に対応する²⁰⁾。このうち、W-Hのように低いアルベド²¹⁾を持つものはP型小惑星である。P型小惑星も、MBCと同様にMBAの外側に多く分布する始原的な天体だと考えられている。また、最近では、小惑星(65)Cybeleが、C型、P型、X型小惑星の兆候を示し、水氷や有機物の検出がなされている²²⁾。(65)Cybeleは、(24)Themisと2.8μm-4.0μm領域のスペクトルが似ている。先述のとおり、(24)Themisは133P/Elst-PizarroなどのMBCの起源ではないかと考えられている。このような類似性や軌道シミュレーションの結果³⁾から推定すると、W-Hは、そのスペクトル型がC型であろうとX型であろうと、MBCのようにMBAの外側を起源と

する、非常に始原始的な天体であると思われる。

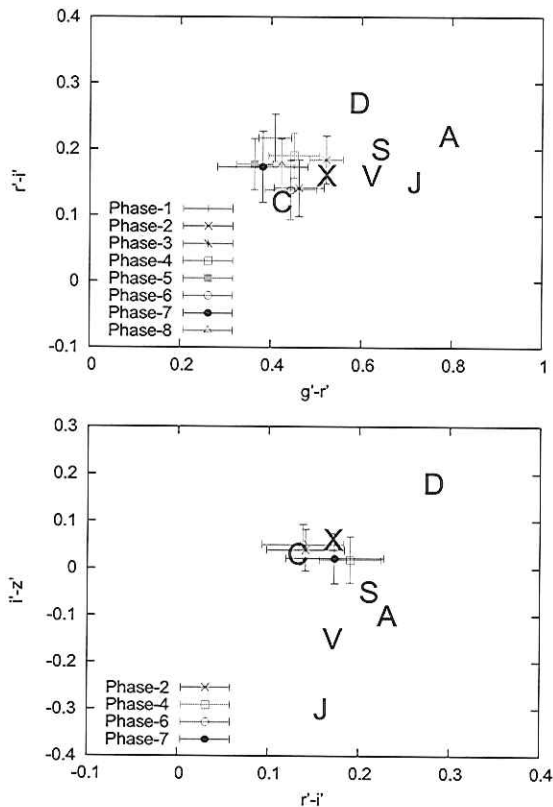


図6. (上) g' , r' , i' 等級による2色図。(下) r' , i' , z' 等級による2色図。図中のアルファベットは小惑星のスペクトルタイプを示す²³⁾。Phase番号は図2における観測時の位相を表し、それぞれ0.0688、0.0809、0.1643、0.2549、0.2641、0.4120、0.5426、0.9725に対応する。Phase-1、-3、-5、-8がOAOでの観測、Phase-2、-4、-6、-7がBSGCでの観測である。

4 議論とまとめ

形状モデルAは歳差運動の可能性を示唆している。もし、歳差運動が起こっているのであれば、その原因の一つとして他天体衝突の可能性が考えられる。133P/Elst-PizarroのようなB型小惑星の場合、その表面下50mから150mに結晶質の水氷が存在し得るという報告がある²⁴⁾。W-Hも同様な状態であれば、他天体衝突で彗星活動を起こす可能性が十分考えられる。また、本研究の多色測光で得られた表面カラーの不均一性が正しいのであれば、それは他天体衝突によるものかもしれない。あるいはNEOであるW-HはMBCと比べると、太陽の熱の影響を十分に受ける。太陽熱の影響で、内部の揮発性物質が昇華し彗星活動が起こり、この時のガスの噴出が歳差の原因となった可能性も考えられる。一方、形状モデルBの場合は、一般的な小惑星と同様な形状をしているものと考えられる。

本研究により、ライトカーブ観測からW-Hの自転の様子を明らかにした。明らかになった自転状態は、W-Hが歳差運動をしている可能性を示唆している。また、本研究で得られた自転に関する情報は、W-Hの熱モデルの議論や、将来のサンプルリターンミッションを策定する上でも重要である。これまで、スターダストによるヴィルト2彗星のサンプルを得ている。また、はやぶさによりイトカワのサンプルも得た。彗星/小惑星遷移天体である、W-Hのサンプルを得ることができれば、これら先行する二つのサンプルと比較する上でも非常に有意義であると考えられる。

参考文献

- 1) McFadden, L.A., Ostro, S.J., Barker, E.S., Cochran, A.N., Cruikshank, D.P., Hartman, W.K., Soifer, B.T., & Veeder, G.D.J. 1984. 2201 Oljato: An Asteroid, a Comet, or Both? *Bulletin of the American Astronomical Society* 16, 691.
- 2) Gustafson, B.A.S. 1989. Geminid meteoroids traced to cometary activity on Phaethon. *Astronomy & Astrophysics* 225, 533-540.
- 3) Bottke, W.F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., & Metcalfe, T. 2002. Debaised Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus* 156, 399-433.
- 4) Heieh, H.H., & Jewitt, D. 2006. A population of comets in the main asteroid belt. *Science* 312, 561-563.
- 5) Jewitt, D., Weaver, H., Agarwal, J., Mutchler, M. & Michal, D. 2010. A disruption of the main-belt asteroid P/2010 A2. *Nature* 467, 817-819.
- 6) Haghhighipour, N., 2009. Dynamical constraints on the origin of Main Belt comets. *Meteoritics & Planetary Science* 44, 1863-1869.
- 7) Yang, B., & Jewitt, D. 2010. Identification of Magnetite in B-type Asteroids. *The Astronomical Journal* 140, 692-698.
- 8) Clark, B.e., et al. 2010. Spectroscopy of B-type asteroids: Subgroups and meteorite analogs. *Journal of Geophysical Research* 115, E06005.
- 9) Fernandez, Y.R., McFadden, L.A., Lisse, C.M., Helin, E.F., & Chamberlin, A.B. 1997. Analysis of POSS Images of Comet-Asteroid Transition Object 107P/1949 W1 (Wilson-Harrington). *Icarus* 128, 114-126.
- 10) Ishiguro, M., et al. 2011. SEARCH FOR THE COMET ACTIVITY OF 107P/(4015) WILSON-HARRINGTON DURING 2009/2010 APPARITION. *The Astrophysical Journal* 725, 101-.
- 11) Tholen, D.J., & Barucci, M.A. 1989, *Asteroid II* (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 298.
- 12) Chamberlin, A.B., McFadden, L.A., Schulz, R., &

- Schleicher, D.G. and Bus, S.J. 1996. 4015 Wilson-Harrington, 2201 Oljato, and 3200 Phaethon: Search for CN Emission. *Icarus* 119, 173-181.
- 13) Yoshikawa, M., Yano, H., Kawaguchi, J., Hayabusa-2 Pre-Project Team, & Small Body Exploration Wg. 2008. Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstract 39, 117.
- 14) Harris, A.W., & Young, J.W., 1983. Asteroid rotation. IV. *Icarus* 54, 59-109.
- 15) Osip, D., Campins, H., & Schleicher, D.G., 1995. The rotation state of 4015 Wilson-Harrington: Revisiting origins for the near-Earth asteroids. *Icarus* 114, 423-426.
- 16) Lomb, N.R., 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysical and Space Science* 39, 447-462.
- 17) Magnusson, P., 1986. Distribution of Spin Axes and Sence of Rotation for 20 Large Asteroids. *Icarus* 68, 1-39.
- 18) Kaasalainen, M., & Torppa, J., 2001. Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. I. Shape Determinations. *Icarus* 153, 24-36.
- 19) Jordi, K., Grebel, E.K., & Ammon, K., 2006. Empirical color transformations between SDSS system and other photometric system. *Astronomy and Astrophysics* 460, 339-347.
- 20) Bottke, W.F., Jr., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R.P., 2002. Asteroid III (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press)
- 21) Licandro, J. et al., 2009. Spitzer observations of the asteroid-comet transition object and potential spacecraft target 107P (4015) Wilson-Harrington. *Astronomy and Astrophysics* 507, 1667-1670.
- 22) Licandro, J., Campins, H., Kelley, M., Hargrove, K., Pinilla-Alonso, N., Cruikshank, D., Rivkin, A.S., and Emery, J., 2011. (65) Cybele: detection of small silicate, water-ice, and organic. *Astronomy and Astrophysics* 525, A34.
- 23) Ivezi'c, Z., & 32 colleagues., 2001. Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *The Astronomical Journal* 122, 2749-2784.
- 24) Prialnik, D., & Rosenberg, E.D., 2009. Can ice survive in main-belt comets? Long-term evolution models of comet 133P/Elst-Pizarro. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 399, L79-L83.

(2011年1月25日受付, 2011年5月1日受理)