

TDI モードによる人工天体の短周期変光観測： 短周期ライトカーブに見られる長期的変動

奥村真一郎¹⁾・西山広太¹⁾

¹⁾ 日本スペースガード協会

Observations of the Short-period Variability of Artificial Objects using Time Delay Integration Technique: Long-term Variations in their Short-period Light Curve

Shin-ichiro OKUMURA¹⁾ and Kota NISHIYAMA¹⁾

Abstract

Time Delay Integration (TDI) CCD readout is one of the practical methods for obtaining the short-term light curve of artificial objects. With the TDI method, we can easily get such a short-term light curve with a normal CCD, without a very high-speed readout CCD or a CMOS camera. About 180 artificial objects have been observed with the method, and it is found that about half of them have short-term variability in their light curves. We also found that some retired satellites or space debris show long-term variations in the shape and/or period of their light curves. A few examples of the results are presented here.

Key Words: Space Debris, Light Curve, Time Delay Integration, Tumbling Motion

1 はじめに

宇宙物体（人工天体）の光度の時間変化（ライトカーブ）を調べることにより、その物体の回転運動の様子や形状を推定することが可能となる。しかし、CCDの読み出しにかかる時間（一般的に数秒から数十秒）より短い時間スケールの変動を調べようとすると、高速読み出しが可能なCCD、もしくはCMOSを使用するのなければそのような短い時間スケールのライトカーブを得ることは難しい。短時間スケールのライトカーブを手軽に効率良く得ることのできる一つの方法は、Time Delay Integration (TDI) 方式によるCCDの読み出しを応用することである。目的の物体を望遠鏡で追尾しながら、シャッターを開いたままでCCDの電荷転送を行うことにより線上に伸びた像を造り出し、そのプロフィールからライトカーブを抽出するという方法である。観測装置や観測の手法についてはこれまでの報告¹⁾⁴⁾を参照されたい。ここでは、長期的なモニターによりライトカーブの周期に変化が見られた人工天体の観測例について紹介する。

2 観測結果

2011年の暮れ以降、この手法により約180個の人工天体のライトカーブを取得した。半数以上の物体で何ら

かの光度変化が見られ、そのうち70個の物体については数秒から30秒程度の短い時間周期の光度変化が確認されている。このうちのいくつかの物体について、数年の時間を隔てた後のライトカーブの変化を調べた。その結果の一部について、特にライトカーブの周期に変化の見られた例について以下に紹介する。ライトカーブのデータはいずれも美星スペースガードセンターの1 m望遠鏡を使用し、TDI方式を用いて転送タイミング0.14秒¹⁾のセッティングで観測したものである。

図1は1990年に打ち上げ、2002年に運用を終了した「JCSAT-2」衛星の短時間周期ライトカーブである。ライトカーブの山2つ分を1周期と考えると、2012年に3.92秒だった周期が2014年には3.99秒、さらに2015年には4.02秒と、時間が経つにつれ微妙に周期が長くなっている様子が検出された。

図2は1989年打ち上げ、1998年に運用を終了した「JCSAT-1」衛星のライトカーブである。この衛星の場合逆に、2012年から2014年にかけて周期が短くなっている。

¹⁾ とりの行への転送タイミングが0.14秒であるが、典型的な星像サイズを考慮したときの実質的な時間分解能は約0.24秒となる。

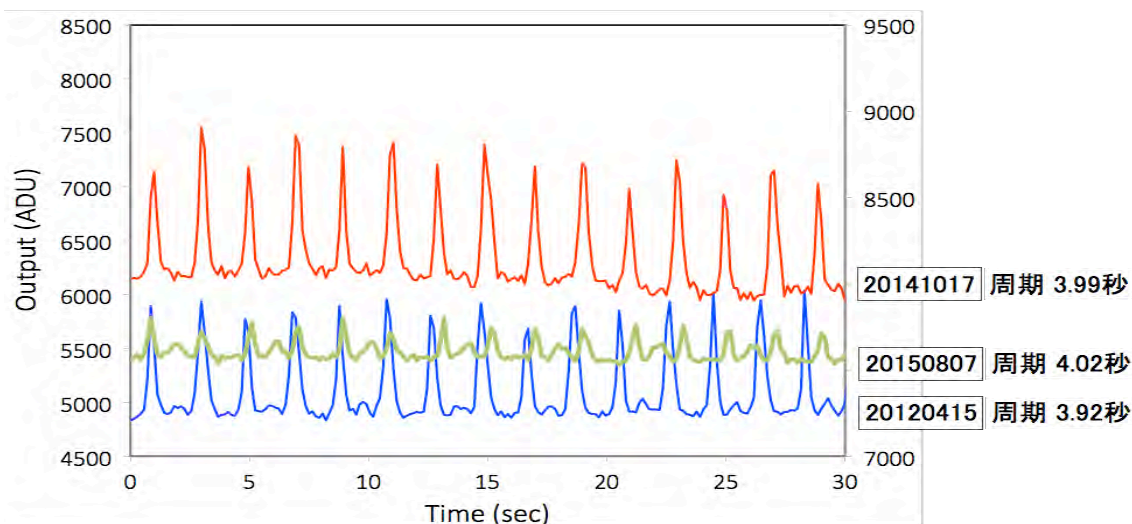


図1 「JCSAT-2」衛星のライトカーブ。青、赤、緑がそれぞれ2012年、2014年、2015年に取得したライトカーブを示す。縦軸は等級ではなく背景光を含む生の出力値である。

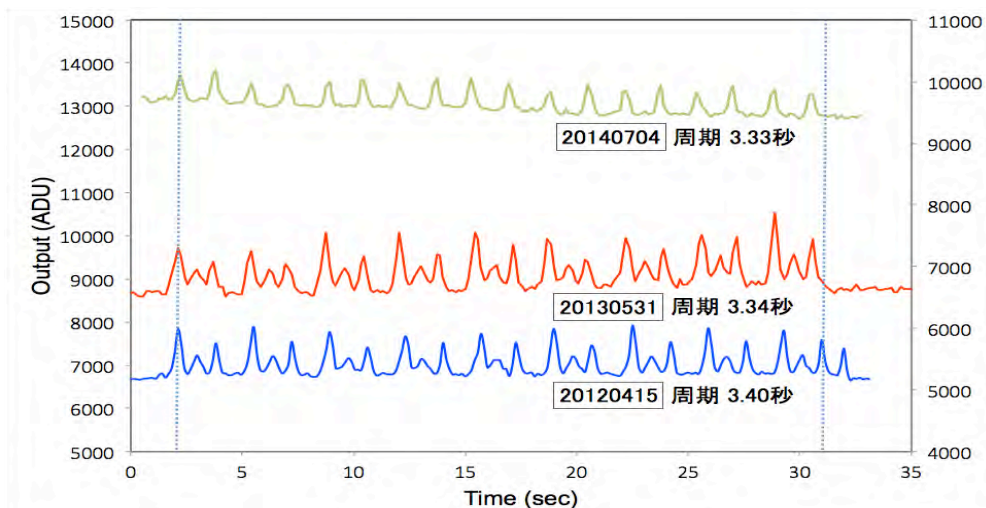


図2 「JCSAT-1」衛星のライトカーブ。青、赤、緑がそれぞれ2012年、2013年、2014年のデータ。

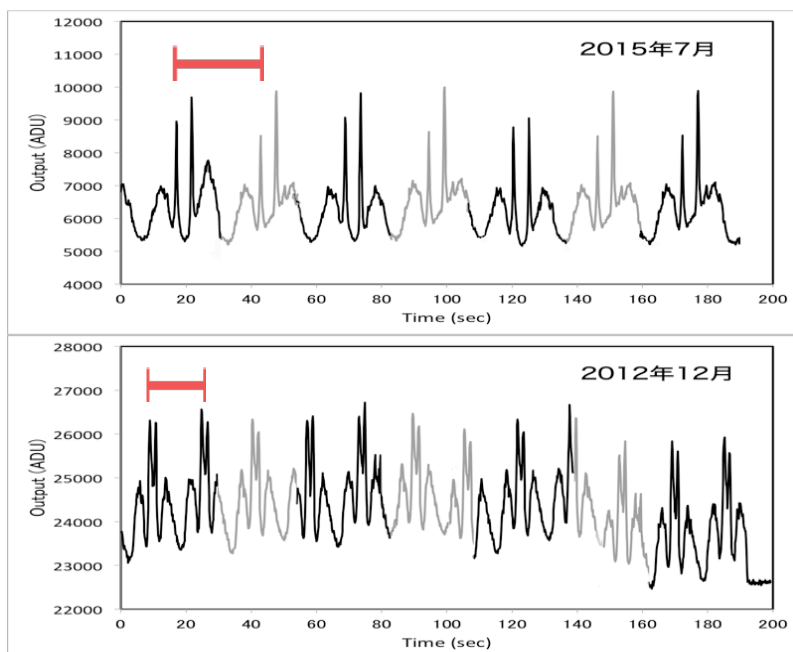


図3 H-IIAロケットボディのライトカーブ。下段が2012年、上段が2015年。黒線は実測データ、灰色部分はデータがなく内挿した。2012年12月には16秒だった周期が2015年7月には約26秒に変わっている

図3は2008年に「きずな」衛星を打ち上げたH-IIA ロケットのボディ(R/B)のライトカーブで、下段が2012年、上段が2015年の測定で30秒間のライトカーブを4回連続で露出して取得したものである。灰色部分はCCDの読み出しのためデータが欠損している部分を内挿して補完し、つなぎ合わせたものである。ライトカーブの形状から「H」印で示す間隔が1周期と考えられる。2012年12月には16秒だった周期が2015年7月には約26秒に変わっていることがわかった。

3 考察

以上の3つの観測例について周期変動の要因を推定するため、各人工天体の軌道を調査した。変光周期の変化と軌道をまとめたのが表1である。上の2つはいわゆる高度36000kmにある「静止軌道帯」の人工天体、一方3つ目のロケットボディは「トランスファ軌道」と呼ばれる、楕円形の軌道を回る人工天体である。

表1 各人工天体のライトカーブ周期の変動と軌道

人工天体名	変動周期の 変化	軌道長 半径	遠地点 距離	近地点 距離
JCSAT-2	+0.003 秒/年 (+0.75%/年)	42658 km	36544 km	36016 km
JCSAT-1	-0.056 秒/年 (-1.7%/年)	42372 km	36023 km	35965 km
H-IIA R/B	+3.83 秒/年 (+24%/年)	22346 km	31683 km	253 km

ライトカーブが人工天体の回転運動により生じていると仮定すると、ライトカーブの周期の変動は回転運動の周期の変動を表すことになる。ロケットボディについて注目すべきなのは近地点距離が非常に近いことである。253kmという距離は国際宇宙ステーションが飛んでいる位置よりも地球に近い距離まで近づくことを示しており、この距離まで近づくとならば地球大気の抵抗を受けることになる。今回観測したロケットボディに関しては地球に近づく度に抵抗を受け、回転の周期が遅くなったのではないかと推定される。一方、静止軌道の人工天体は地球大気による抵抗は無視できる状態にある。そのような状況での回転周期変動の要因としてはYORP効果²が考えられる。

²太陽から受ける光の圧力（輻射圧）と物体からの熱放射のバランスが場所により異なることにより、回転を加速/減速させる効果の事。

4 今後の展開

今回は特に回転周期に変動の見られた物体に着目してきたが、将来的には既知の人工天体のライトカーブの分析を進め、そのデータをもとに未知の宇宙デブリのライトカーブからその素性を推定することを目指す。ただし既知の物体のライトカーブは比較的単純な形状を示すものが多いのに対し、デブリのライトカーブは複雑な形状を示すものが多く、それほど容易ではないことは予想される。

5 謝辞

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構追跡ネットワーク技術センターの皆様には観測の機会および多くの有用なコメントをいただきました。美星スペースガードセンターは一般財団法人日本宇宙フォーラムの管理により運用されています。

参考文献

- 1) 奥村真一郎, 西山広太, 浦川聖太郎, 坂本 強, 高橋典嗣, 吉川 真, Time Delay Integrationモードの応用による人工衛星/スペースデブリの光度短周期時間変動観測, スペースガード研究, 4, pp51-54, 2012.
- 2) 奥村真一郎, 浦川聖太郎, 西山広太, 坂本 強, 浅見敦夫, 橋本就安, 高橋典嗣, 吉川 真, Time Delay Integrationモードの応用による人工衛星/スペースデブリの光度短周期時間変動観測 II, スペースガード研究, 5, pp66-68, 2013.
- 3) Okumura, S., Yanagisawa, T., Nakaya, H., Tanaka, W., Nishiyama, K., Takahashi, N., and Yoshikawa, M., Application of the Time Delay Integration Method: Survey Observations of Geosynchronous Orbit Objects and Short-Term Variability Observations, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66 (6), 115, 2014.
- 4) 奥村真一郎, 西山広太, 高橋典嗣, 吉川 真, Time Delay Integrationモードの応用による人工衛星/スペースデブリの光度短周期時間変動観測 III, スペースガード研究, 7, pp70-72, 2015.

(2016年1月15日受付, 2016年1月30日受理)