

TDIモードを応用した短周期変光観測 III: 短周期ライトカーブに見られる長期的変動

○奥村真一郎、西山広太（日本スペースガード協会）

TDI方式の読み出しを応用することにより、CCDカメラを利用して人工天体の短時間ライトカーブを取得し、そこから人工物体の回転運動状態を推定する研究を進めてきた。数多くの運用衛星やデブリについて観測を行ってきた結果、ライトカーブの形状や周期に長期的な変動の見られる物体が見つまっている。ライトカーブの変動の要因となる回転運動状態に変化が生じた理由について、軌道との関係から考察を行った。

1. はじめに

宇宙物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やCMOSを使用するのでもなければそのような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、そのプロファイルからライトカーブを抽出する。観測装置や観測の手法については参考文献を参照されたい[1-3]。

2. 観測例（ライトカーブに長期変動の見られた例）

2015年9月1日現在、180個の人工天体について観測を実施している。その多くのものについては複数回観測を実施しているのでライトカーブの長期変動を知ることが出来る。ここでは長期変化の見られた例について紹介する。以下に紹介するライトカーブはいずれも、0.14秒インターバル（となりの行への転送タイミングが0.14秒で実質的な時間分解能は約0.24秒）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。

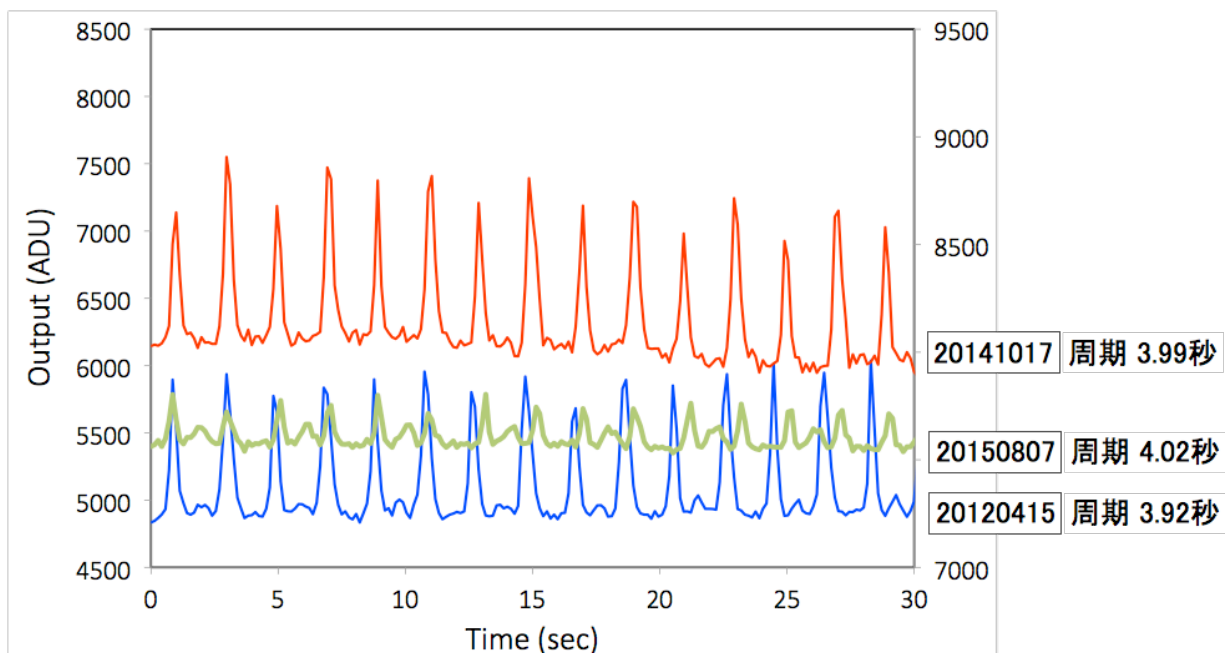


図1 「JCSAT-2」衛星のライトカーブ。青、赤、緑がそれぞれ2012年、2014年、2015年に取得したライトカーブを示す。縦軸は等級ではなく背景光を含む生の測定値である。

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、2012年から2014年にかけて周期が短くなっている。図3は1997打ち上げ、2010年まで運用されていた「BSAT 1A」衛星のライトカーブであり、これも同様に2013年から2015年にかけて周期が短くなっている例である。

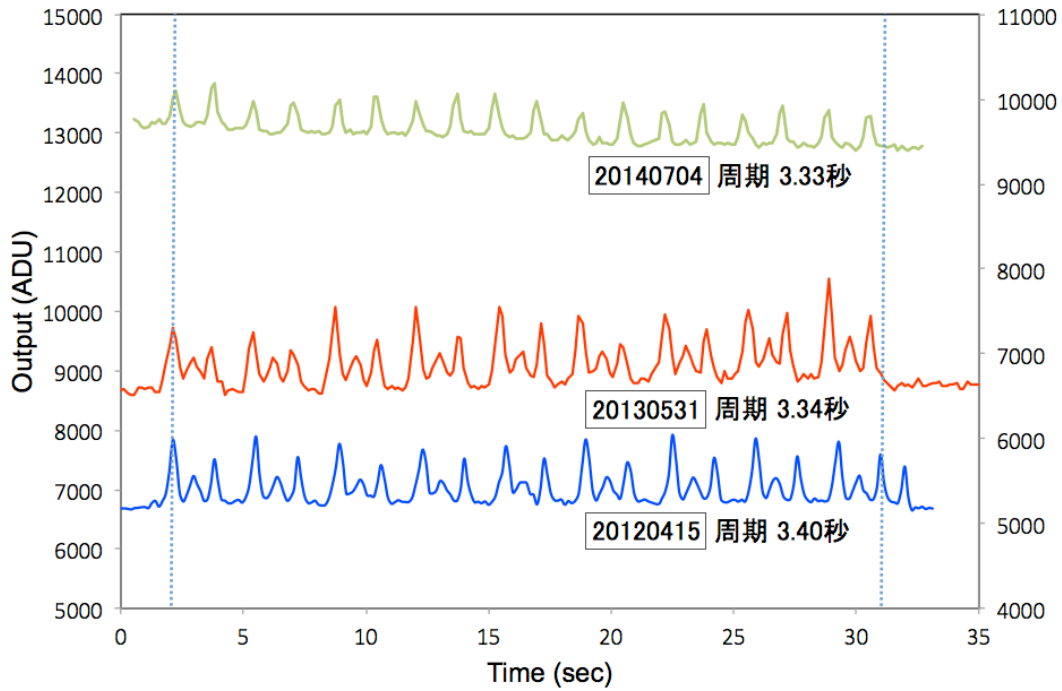


図2 「JCSAT-1」衛星のライトカーブ。青、赤、緑がそれぞれ2012年、2013年、2014年のデータ。

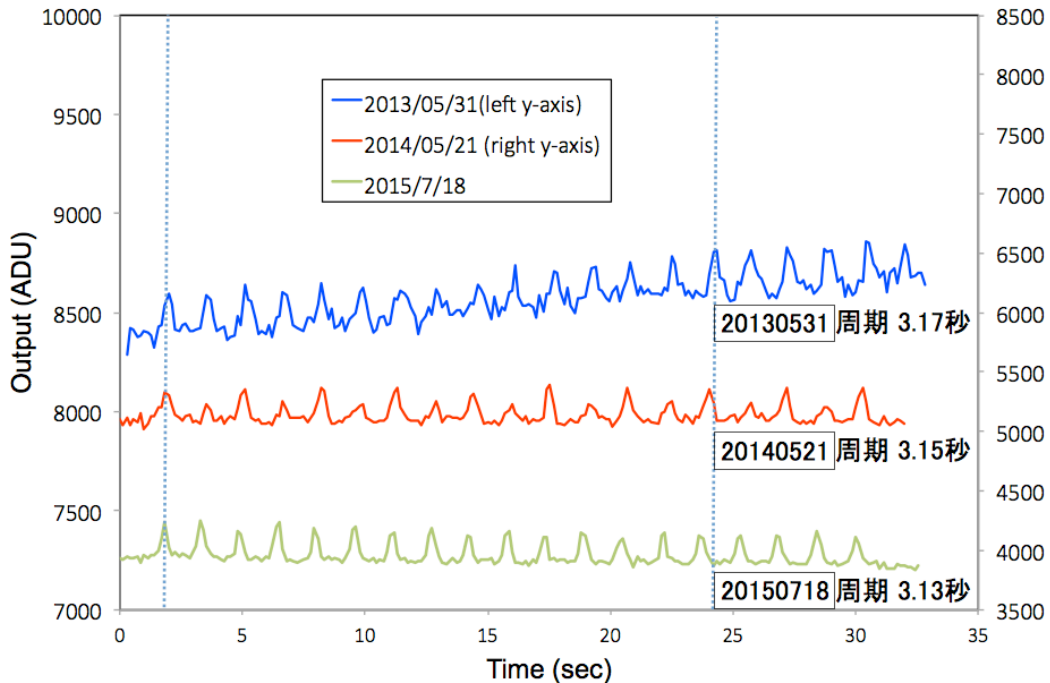



図3 「BSAT 1A」衛星のライトカーブ。青、赤、緑がそれぞれ2013年、2014年、2015年のデータ。

図4は2008年に「きずな」衛星を打ち上げたH-IIAロケットのボディのライトカーブで、下段が2012年、上段が2015年の測定で30秒露出を4回連続で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「」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秒に変わった。

ていることがわかった。

図5もロケットのボディで、1989年にひまわり4号を打ち上げたH-Iロケットボディのライトカーブである。2012年1月、2012年11月、2014年7月と3回観測し、これも同じように周期が長くなっている。

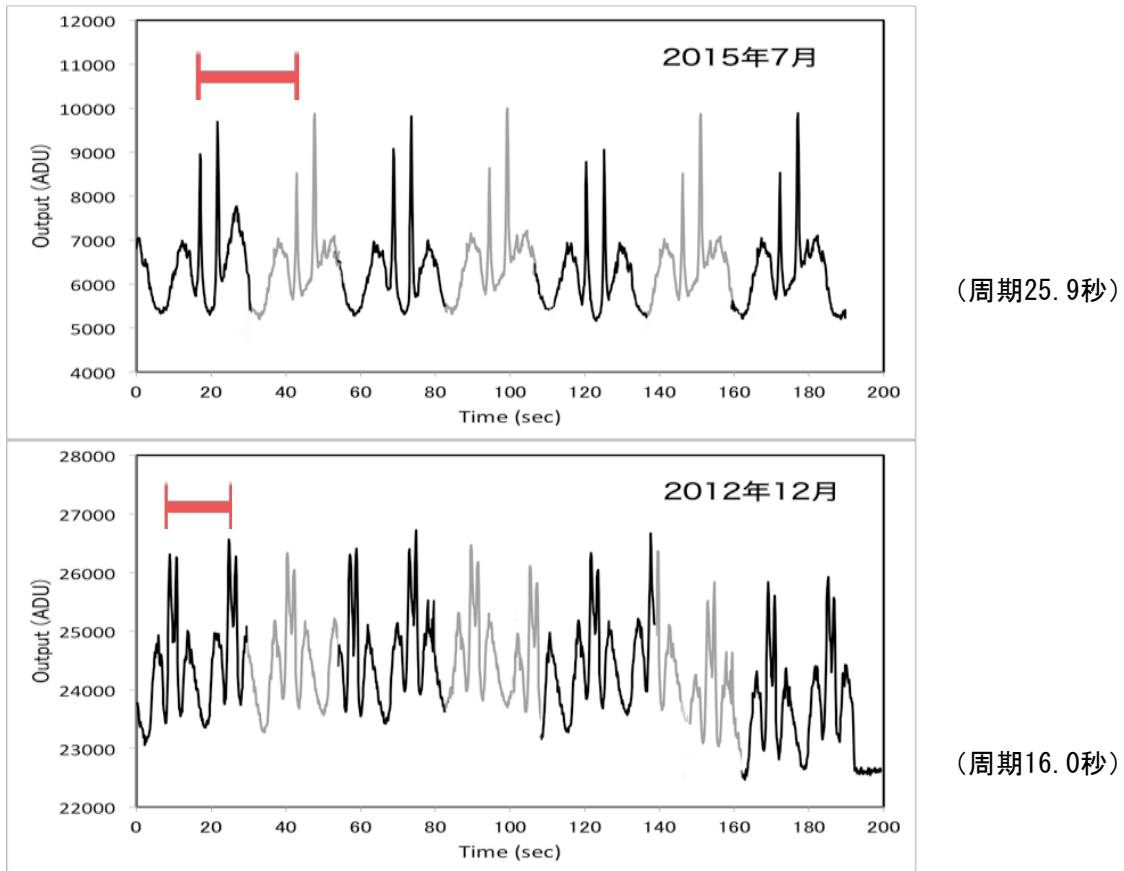


図4 H-IIAロケットボディのライトカーブ。下段が2012年、上段が2015年。黒線は実測データ、灰色部分はデータがなく内挿した。

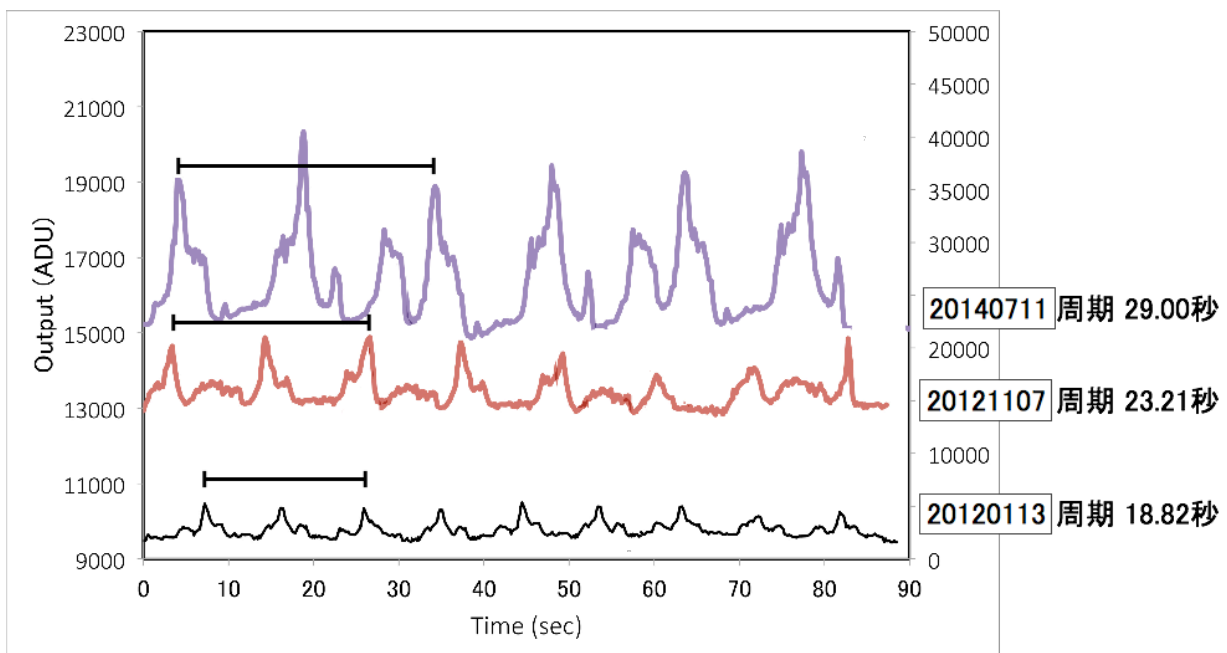


図5 H-Iロケットボディのライトカーブ。2012年1月、2012年11月、2014年7月の測定。

3. 考察

以上の5つの観測例について周期変動の要因を推定するため、各物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3つはいわゆる高度36000kmにある「静止軌道帯」の物体、下の2つ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物体である。

ライトカーブが物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。2つの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、静止軌道の物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*が考えられる。

表1 各物体のライトカーブ周期の変動と軌道

物体名	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)	42658km	36544km	36016km
JCSAT-1	-0.056 秒/年 (-1.7%/年)	42372km	36023km	35965km
BSAT 1A	-0.02 秒/年 (-0.59%/年)	42491km	36129km	36096km
H-IIA R/B (2008-007B)	+3.83 秒/年 (+24%/年)	22346km	31683km	253km
H-I R/B(1) (1989-070B)	+4.07 秒/年 (+21%/年)	12377km	11492km	505km

4. 今後の展開

既知の物体のライトカーブの分析をベースにし、未知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。既知の物体のライトカーブは比較的単純な形状なのに対し、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が予想される。

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。

6. 参考文献

1. 奥村他、「TDI モードを応用した短周期変光観測」、第32回天文学に関する技術シンポジウム集録、58、(2012)
2. 奥村真一郎「TDI モードを応用した短周期変光観測 II」第34回天文学に関する技術シンポジウム集録、32、(2014)
3. S. Okumura et al. 「Application of the Time Delay Integration Method: Survey Observations of Geosynchronous Orbit Objects and Short-Term Variability Observations」, PASJ, 66, 115 (2014)

* YORP 効果とは、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。