

ぐんま天文台 1.5m 望遠鏡による静止衛星観測の試み

橋本修¹⁾・衣笠健三²⁾

¹⁾ ぐんま天文台 ²⁾ 国立天文台野辺山宇宙電波観測所

Photometric and spectroscopic observations of geostationary satellites
with the use of the 1.5m telescope at Gunma Astronomical Observatory

Osamu HASHIMOTO¹⁾ and Kenzo KINUGASA²⁾

Abstract

Photometric and spectroscopic observations of the geostationary satellites Himawari-6 and Himawari-8 were made using the 1.5m telescope at Gunma Astronomical Observatory. Spectra of both satellites resemble the solar spectrum closely. They show no significant spectral features other than those coming from the light source of Sun. Spectral distributions of reflectance calculated by dividing the observed spectra of satellite by the solar spectrum look very smooth without any remarkable structures. On the other hand, their shapes over a wide wavelength range characterized by the continuum levels in the spectra show time dependent difference from satellite to satellite. Such a trend is also seen in the photometric data as they show time variation and redder color than the solar light. It should be more useful and effective to make a simultaneous multi band photometric observation to identify an individual satellite observationally than to make a spectroscopy.

Key Words: geostationary satellite, photometry, spectrum

1 人工衛星の地上観測

現在の地球は数多くの人工衛星に囲まれているが、今後もその数は著しく増加することが見込まれている。しかも、これらに加えて、廃棄された衛星や破壊された衛星の破片も大量に宇宙空間を漂うこととなり、それらを識別したうえで追跡・管理することが、今後の安定した宇宙空間の利用には不可欠な状況となっている。このため、近年では地上からの観測で、衛星の検知や識別を行うことが積極的に提案されるようになってきている。そこで、具体的な手法を検討するための基礎的なデータを取得するために、ぐんま天文台1.5m望遠鏡を用いて人工衛星の測光および分光観測を試みた。

ぐんま天文台の1.5m望遠鏡(図1)は、天球上で静止した遠方の天体を高精度で観測することを目的とした設計がなされており、恒星時で移動する天体の観測には優れた指向・追尾性能を示すものの、高速で移動する人工衛星の観測には不向きな望遠鏡である。しかし、地球の自転と同期する静止衛星は、その名の通り見掛けの動きが小さく、方位と高度を固定することで指向することが例外的に可能である。ここでは、気象衛星として我々日本人には馴染みの深い「ひまわり6号」と「みまわり8号」のふたつの静止衛星を対象として観測

を実施した。

2 観測

観測は、ぐんま天文台1.5m望遠鏡に設置された低分散分光撮像装置(GLOWS: Gunma LOW resolution Spectrograph and imager)を用いて行った。波長420nmから800nmにかけて、波長分解能($\lambda/\delta\lambda$)400程度の分光ができる装置で、設定を変えることによって $10' \times 10'$ 程度の視野での撮像も可能である。

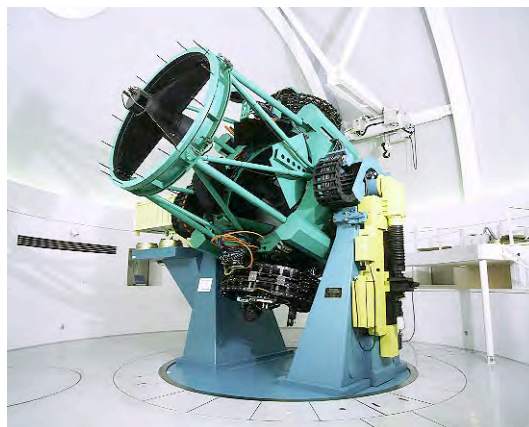


図1. ぐんま天文台1.5m望遠鏡

1.5m望遠鏡は経緯台式の架台によって天体を指向・追尾する構造になっており、高い精度を実現するために、地球大気による浮かび上がりや、重力による機械構造の撓みを補正するなどの精密な数値制御が行われている。天球上の座標ではなく、方位と高度を指定しての指向を行う静止衛星の場合にもこのような補正が有効であることが確認され、各時刻での正確な方位と高度の情報が提供されれば、観測装置の視野中央部に目的の天体を補正することが可能である。

そのような衛星の位置情報は、NORAD¹⁾より取得したTwo-Line Element Sets (TLE)を用いて、JAXAの軌道情報サービス²⁾において計算した。ここで得られた観測時刻での位置に望遠鏡を指向し、観測を実施した。

2.1 測光観測

「ひまわり6号」に対して、**B, V, R, I** バンドの撮像観測を2015年6月4日に行った。各バンドパスフィルタに対して、60秒の露出をそれぞれ10回連続で行っている。得られた画像の例を図2に示す。望遠鏡の恒星追尾は停止しているため、静止衛星が点状に、背景の恒星が視野中の移動のため線状に写っている。

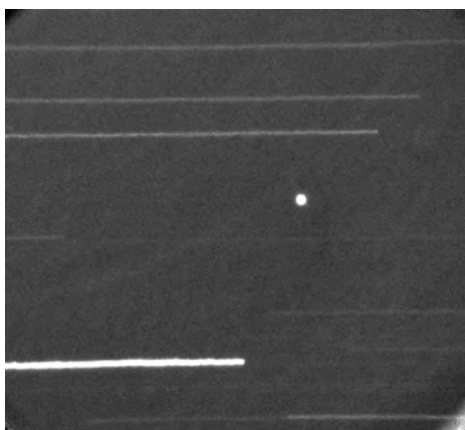


図2. 「ひまわり6号」のVバンドでの画像、点状に写っているのが静止衛星で棒状に伸びているのが背景の恒星、望遠鏡の恒星追尾は停止してある。

比較のために、Landolt³⁾による標準星106 700 ($V = 9.785$ mag)を用いて測光を行った。観測を継続している時間における、標準星の測光値の変化は、いずれのバンドでも0.003等以下であり、極めて安定した測光夜であった。この時に得られた「ひまわり6号」の測光値は以下の通りである。

$$B = 12.83 \pm 0.22 \text{ mag}$$

$$V = 11.97 \pm 0.02 \text{ mag}$$

$$R = 11.27 \pm 0.02 \text{ mag}$$

$$I = 10.55 \pm 0.03 \text{ mag}$$

変動幅は複数の測光値のばらつきの標準偏差で示してある。この観測時の測光精度は少なくとも0.01等よりも高く、これらのばらつきは実際の変動が反映されたものであると考えられる。測光値の時間変化をプロットしたものが図3であるが、全体のゆるやかな変化は、太陽と観測値の位相関係に依存した大局的な変化であるとみなすことができる。一方で、波立つ小さな変動は、衛星の構造などに依存したより微細な変動が反映されている可能性が高い。なお、図3では、最初の露出からの経過時間を横軸にとってある。各バンドの露出はフィルターを交換しながら、それぞれ独立に観測を行っているため、バンドが異なれば観測時刻は異なり、同じ経過時間の測定値であっても同時ではないことに注意していただきたい。**B, V, R, I** 全てのバンドで変動が見られるが、その振幅は **B** バンドのみで際だって大きなものとなっている。

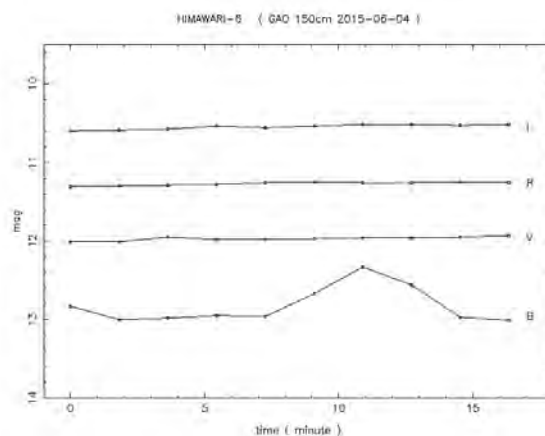


図3. 「ひまわり6号」における測光値の時間変化。下から **B, V, R, I** バンド、横軸は各バンドで観測開始からの経過時間、経過時間が同じであってもバンドが異なれば必ずしも同時刻ではない。

大局的な測光値から色指数を求めてみると、

$$B - V = 0.86$$

$$V - R = 0.70$$

$$R - I = 0.72$$

となり、太陽を反射した光でありながら、太陽の色指数 $B - V = 0.650$ よりもかなり赤い色を示しており、機体の色が赤みを帯びたものであることがわかる。

2.2 分光観測

GLOWSの分光モードを用いて「ひまわり6号」と「ひまわり8号」の分光観測を行った。観測は、2015年10月25日と11月3日に行われている。それぞれの衛星に対して、1回の観測につき、120秒の露出を10-23回繰り返している。露出時間の設定は観測対象の明るさに依存するが、視野内での天体の動きにも依存する。静止衛星といえども、それぞれの個体によって微妙な運動をしており、分光器の視野の中での動きが無視できない場合も少なくないようである。較正には、同じ夜に観測した $V = 4.4$ mag の分光標準星 HR1544⁴⁾ のスペクトルを用いている。

図4に観測されたスペクトルの例を示す。上から順に、「ひまわり6号」、「ひまわり8号」と月のスペクトルである。月は太陽の光を反射しているため、太陽のスペクトルを代表する光源の基準として同じ観測夜に観測を実施している。月には面積があるため、スペクトル像の幅が広がっている。また、「ひまわり6号」は「ひまわり8号」に比べて視野の中での動きが大きいため、スペクトル像の幅も広く写っている。

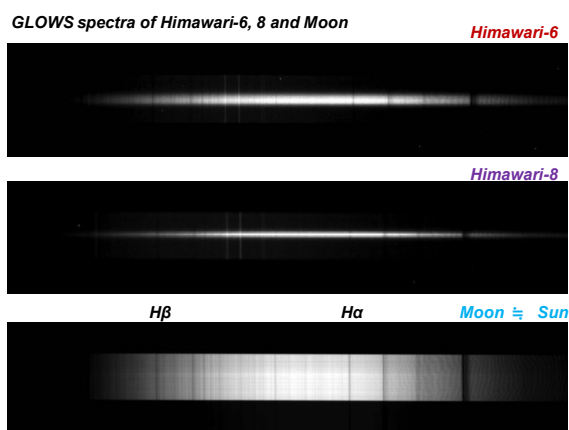


図4. 衛星のスペクトル画像, 上から「ひまわり6号」「ひまわり8号」で、下段は月のスペクトルで太陽のスペクトルを代表している。

3 議論

「ひまわり6号」と「ひまわり8号」では、どちらの人工衛星で得られたスペクトルとも、月のスペクトルと非常によく似ている。いずれも太陽光を反射したものであるため、極めて当然の結果とも言えるが、人工衛星の反射特性には、際だった分光的な特長がないことが確認されたと言える。10月25日に観測されたスペクトルを波長分布として表現したものが図5である。上から「ひまわり6号」、「ひまわり8号」、月の順である。この図からも、人工衛星と太陽スペクトルの示す分光的特徴がほぼ完全に同一のものであることがわかる。

ただし、連続波成分が示す大局的な構造には、それぞれの天体での差異があり、測光的には異なる性質を示す可能性があることには注目が必要である。

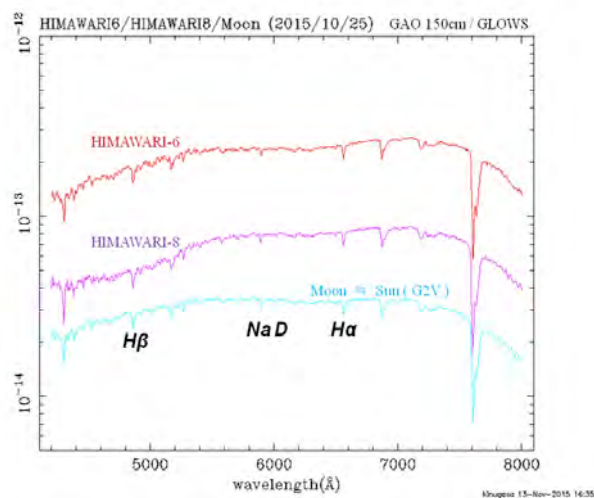


図5. 衛星のスペクトル, 上から「ひまわり6号」「ひまわり8号」で、下段は月のスペクトル

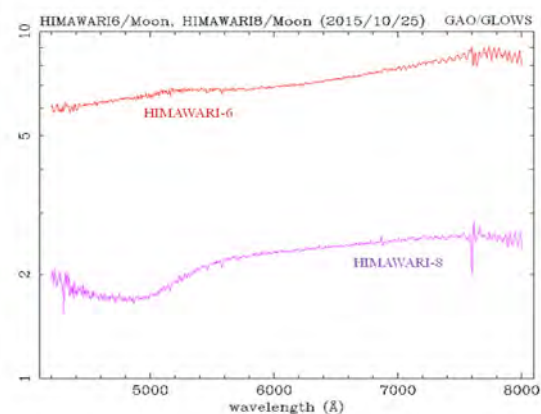


図6. 人工衛星の反射スペクトル, 上から「ひまわり6号」「ひまわり8号」

ふたつの人工衛星のスペクトルを太陽光の代理として取得した月のスペクトルで割ることによって得た、人工衛星の反射スペクトルを図6に示す。どちらの人工衛星にも、分光的に特徴的な構造が見られないことがより明確に見てとれる。ここでも、連続波による全体的な構造は衛星によって異なっており、人工衛星の個性は、分光データよりも測光データにより強く反映される傾向が示されている。いずれの人工衛星の場合も短波長側での反射効率が小さく、測光値で見られた機体の赤い色がここでも示されている。

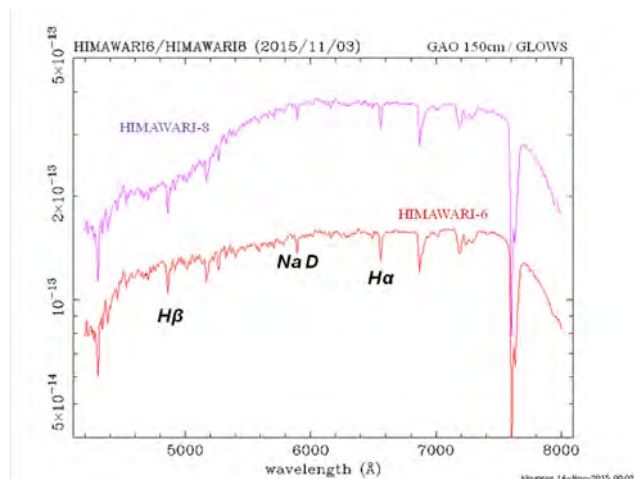


図7. 2015年11月3日に再度取得された人工衛星のスペクトル, 上から「ひまわり8号」「ひまわり6号」

11月3日に追加観測されたスペクトルを図7に示す。どちらの人工衛星も、分光的な特徴はやはり太陽光と同じものであり、あくまでも太陽光を反射していることを示している。しかし、連続波による大局的な構造は10月25日のから大きく変化しており、測光的には特性が変化していることは間違いない。「ひまわり8号」で、その変化はより大きく、400–550nm付近での強度が10月25日より大きく後退し、より赤い色を示している。

10月と11月の二回の観測を通じて、静止衛星と言うものの、固体によって、その位置の変化に大きな違いがあり、観測の実施に影響があることも明らかになった。図4で見られるように、動きの大きな衛星は、スペクトル像が広がるうえ、分光器上に天体を補足するための追尾にもより細心の注意が必要となる。「ひまわり6号」は「ひまわり8号」に比べて動きが大きい、地心の軌道要素を比較すると、軌道傾斜各 i と離心率 e について、前者では $i \sim 0.4 \text{ deg}$, $e \sim 0.0033$ であるのに対して、後者は $i \sim 0.02 \text{ deg}$, $e \sim 0.0008$ となっており、赤道面の真円からのずれが前者の方でより大きく、それがより大きな位置の変化に反映されている。

以上のような人工衛星の観測的な特性を勘案すれば、人工衛星の識別には、大掛かりな観測装置と大きな集光力を必要とする分光観測を無理に実施するよりも、複数の波長で同時に測光するような観測がより効果的であると考えられる。同じ規模の望遠鏡を用いるのであれば、そのような観測手法を採用することによって、より暗く小さな人工天体を補足、識別することが可能となる。また、測光であれば、計測に必要なとされる積分時間も小さく、移動が大きな天体に対しても、望遠

鏡や観測装置に要求される追尾精度などの要件はより緩和されるはずである。

4 まとめ

ぐんま天文台の1.5m望遠鏡と低分散分光撮像装置GLOWSを用いて「ひまわり6号」と「ひまわり8号」の測光と分光観測を行った。1.5m望遠鏡を支える経緯台式架台の制御特性から、静止衛星の軌道要素から求められた、方位と高度をそのまま指定することによって、目標を十分な精度で、指向することが可能であり、多少の移動はあるものの、静止衛星故に、望遠鏡の追尾機能を停止した状態で、補足したまま観測を継続すること可能であった。

測光観測の結果からは、太陽との位相角の変化に由来するゆるやかな明るさの変化に加え、数分単位のタイムスケールでの微小な変化が観測され、その変動幅は B バンドの波長域で顕著になっている。また、測光から得られた色指数は光源である太陽よりも赤く、人工衛星の機体が赤みを帯びた色をしていることが示されている。

本質的に衛星に反射された太陽光を観測しているため、観測されたふたつの人工衛星いずれのスペクトルにも、太陽に由来するもの以外の分光的な特徴は見られなかった。一方で、連続波成分に由来する大局的な波長分布には人工衛星毎に異なる緩やかな構造があり、時間とともに変化していることも明らかになってきた。

連続波による大局的な波長分布の変化は、測光値の変化や色指数の傾向に反映されるものであり、測光観測から得られた、時間変化や赤みを帯びた反射特性とも一致する結果が得られている。

このような人工衛星の観測的な特性から、人工衛星の識別には、分光観測を実施するよりも、複数の波長における同時測光観測がより効果的である。同じ規模の望遠鏡を用いても、分光観測に比べてより暗く小さな人工天体まで補足、識別することが可能である。しかも、追尾精度などの望遠鏡や観測装置に要求される性能もより緩やかなものになるはずである。

参考文献

- 1) NORAD Two-Line Element Sets Current Data
<http://www.celestrak.com/NORAD/elements/>
- 2) JAXA 軌道情報提供サービス
<http://odweb.tksc.jaxa.jp/odds/main.jsp>
- 3) Landolt, A. U. 1992, AJ 104, pp.340-371, 436-491
- 4) Hamuy, M., et al. 1993, PASP 104, pp.533-552

(2015年12月26日受付, 2016年1月30日受理)