

## 岡山観測所における小惑星観測

黒田大介<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 国立天文台岡山天体物理観測所

### Recent Observations of Asteroids at the Okayama Astrophysical Observatory

Daisuke KURODA<sup>1)</sup>

#### Abstract

This report is presented about spectroscopic and photometric studies of asteroids using 188-cm telescope and 50-cm telescope at Okayama Astrophysical Observatory. Spectroscopic measurements of asteroids, which mainly aimed at a taxonomic classification based on spectral shape, can perform by means of two instruments on the 188-cm telescope: that is KOOLS<sup>1)</sup> for optical region (0.49-0.94  $\mu\text{m}$ ) and ISLE<sup>2),3)</sup> for near-infrared region (0.95-2.37  $\mu\text{m}$ ). Both instruments are available a wide slit with non-sidereal telescope tracking and provide a low dispersion spectrum suitable for this purpose. The photometric observations of asteroids have been conducted using 50-cm telescope with multi-band imager. This imager which was developed by MITSuME projects<sup>4),5)</sup> enables simultaneous measurements of  $g'$ ,  $R_c$ , and  $I_c$ , thereby being useful for deriving a multi-band light curve and/or color variation. Recent photometric analyses of asteroids were attempted to apply an image subtraction method as advanced approach. Previous observations and results are introduced in this report.

Key Words: asteroid, spectroscopy, photometry, NEA

#### 1 イントロダクション

国立天文台岡山天体物理観測所では、小惑星の可視・近赤外分光観測を188-cm望遠鏡で、多色測光観測を50-cm望遠鏡によって実施してきた(図1)。

分光観測は、小惑星の反射スペクトルから、その表面の鉱物学的特徴をとらえることを目的とする。この観測では、可視分光・撮像観測装置KOOLS<sup>1)</sup>、近赤外撮像・分光装置ISLE<sup>2),3)</sup>に、広めのスリットと低分散素子を用いる。分光観測中の望遠鏡は、露出時間が長いため小惑星を追尾するように駆動する。

測光観測は、小惑星のライトカーブから自転周期、形状推定、色による簡易的なスペクトル分類、位相関数などの情報を得ることを目的とする。50-cm望遠鏡は、3バンド同時撮像カメラMITSuME<sup>4),5)</sup>が常時搭載され、 $g'$ 、 $R_c$ 、 $I_c$ の測光データを同時に取得できる。50-cm望遠鏡は、予め決まったスケジュールに基づいて観測を遂行するロボット望遠鏡であるため、時間軸を使うモニター観測に適している。

本報告では、2章で188-cmによる小惑星の分光観測、3章で50-cmによる測光観測とイメージサブトラクション法を使用した小惑星の測光解析について、最近の観測と研究成果とともに紹介する。



図1 岡山天体物理観測所188-cm望遠鏡と可視分光・撮像装置KOOLS(左)、50-cm望遠鏡と3バンド同時撮像カメラMITSuME(右)

#### 2 188cm望遠鏡による小惑星の分光観測

本章では、図1左に示す188-cm望遠鏡を使用した小惑星の可視・近赤外分光観測および研究成果について述べる。

小惑星表面は太陽光を反射しているので、観測した小惑星のスペクトルは、太陽類似星のスペクトルと割り算して、小惑星の反射スペクトルとして評価する。

小惑星の反射スペクトルは、小惑星表面を覆う鉱物組成による反射率や吸収帯を反映した特徴を持つ。小惑星の分光観測では、図2に示すように、得られたスペクトルの特徴に基づいた分類<sup>6,7)</sup>や隕石との比較から小惑星表面に存在する鉱物や存在比を推定することができる。

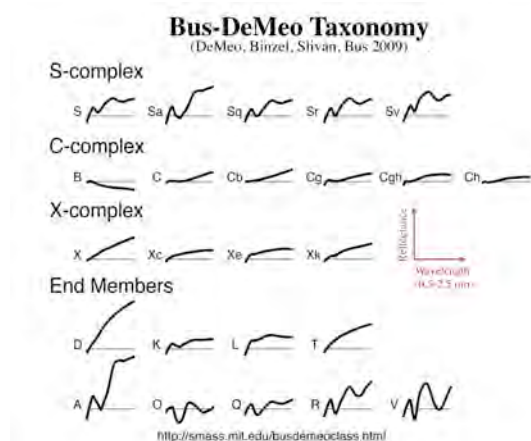


図2 可視近赤外分光スペクトルによる小惑星タイプの分類(Bus-DeMeo Taxonomy)<sup>7)</sup>  
Bus-DeMeo Taxonomyは可視スペクトル(0.44-0.92 μm)に基づく分類(Bus Taxonomy)を近赤外領域に拡張した。

### 2.1 KOOLSによる可視分光観測

可視低分散分光観測によって得られる小惑星の反射スペクトルでは、Bus Taxonomy<sup>6)</sup>をベースにしたスペクトル型の判定を最も簡潔に行うことができる。KOOLSを使用した観測では、Kuroda et al. (2014)<sup>8)</sup>において、2つの地球近傍小惑星(136923) 1998 JH2と

(214869) 2007 PA8、メインベルト小惑星(2574) Ladogaについて報告があった(図3)。この観測では、6秒角スリットと分散素子No.2 (6463 Å blaze)、オーダーカットフィルターY49(4900 Å以下を遮蔽)を使い、分解能180-240で、0.52-0.89 μmの波長域のスペクトルを取得した。この論文では1998 JH2、2007 PA8、Ladogaのスペクトルタイプは、それぞれS、Q/O、K/Xeと判定した。

上述した観測波長域は、スリット位置を変えて2回に分けて観測することによって0.49-0.94 μmまで拡張できる。図4は、(4) Vestaの反射スペクトル<sup>9)</sup>について、KOOLSの観測フレームともに色分けしたものである。この時のスリットの位置と波長範囲は、それぞれ400ピクセルで0.49-0.81 μm(図4中の水色)、100ピクセルで0.67-0.94 μm(図4中の橙色)であった。

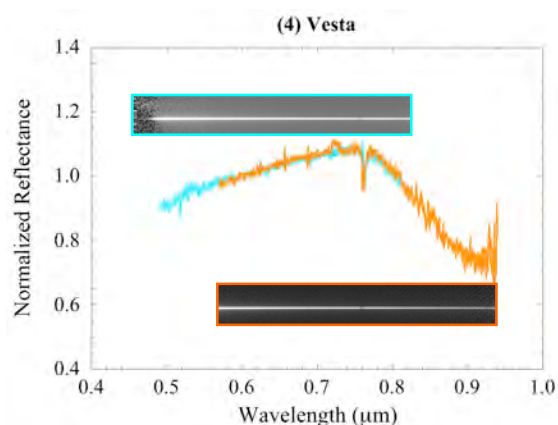


図4 2回に分けて取得した(4) Vestaのスペクトルと対応する分光観測フレーム  
縦軸は0.55 μmで規格化した反射率、横軸は波長を示す。

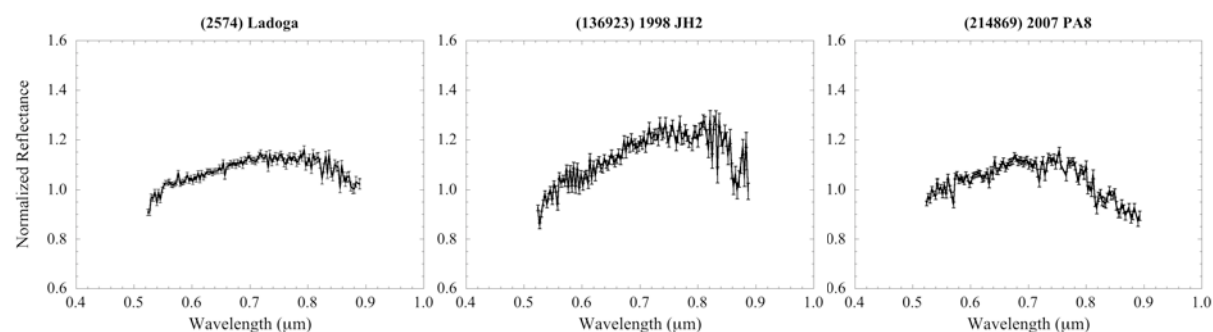


図3 KOOLSで得られた(2574) Ladoga、(136923) 1998 JH2、(214869) 2007 PA8の反射スペクトル  
縦軸は0.55 μmで規格化した反射率、横軸は波長を示す。

### 2.2 ISLEによる近赤外分光観測

可視領域に近赤外領域のスペクトルを加えた Bus-DeMeo taxonomy<sup>7)</sup>によって、より詳細な可視領域だけは判断のし難い小惑星の分類も可能になった。

ISLEを使用した小惑星観測では、5秒角スリット、

分散素子G3(75 groove/mm)を使ったJ、H、K領域(1.11-2.37 μm)の低分散分光観測(分解能70-100)が報告されている<sup>10)</sup>。この観測では、既知のR型メインベルト小惑星(349) Dembowskaについて、先行研究<sup>11)</sup>で報告されていた自転位相による反射スペクトルの局所的な

変動を検出することが狙いであった。その結果は、図5に示すように細部で変化はあったものの、再現性がなかったため局所的な変動は確認できないと判断した。

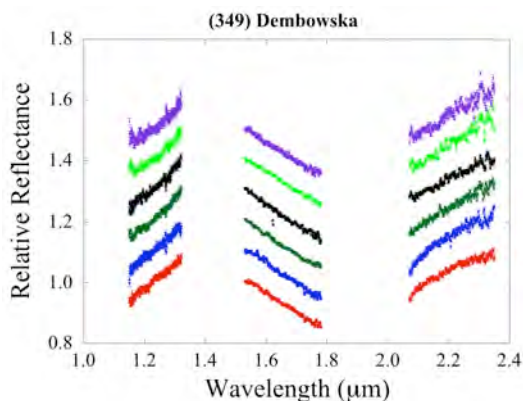


図5 ISLEによる(349) Dembowskaの近赤外スペクトル。縦軸はオフセットをつけた反射率、横軸は波長を示す。色の違いは観測した自転位相の違いであるが、JHKの各バンドは同時に観測していない。

上述の観測では、J、H、Kとそれぞれ分けて3回観測する必要があった。この場合は、J、H、Kと同時に観測可能な波長域に重複がないため、大気や天体位置などの観測条件の影響を受け、スペクトル連続性を確保することが困難であった。そのため、岡山天体物理観測所では、低分散分光観測に限り使用可能なH-Kフィルター製作した。また、2016年1月から、共同利用観測の持ち込みフィルタ(JAXA 長谷川氏による)として、YJH(0.95-1.79 μm)フィルターを導入した。この2種類のフィルターを利用することで、小惑星観測にとって重要な分光波長領域の拡張と観測効率の向上、スペクトルの連続性の確保が実現した。

### 3 50cm望遠鏡による小惑星の測光観測

本章では、50-cm望遠鏡とその専用3バンド同時撮像カメラMITSuMEによる地球近傍小惑星の観測について記述する。この望遠鏡と観測装置は、2004年にガンマ線バーストの残光フォローアップ目的としたMITSuMEプロジェクト<sup>4),5)</sup>によって設置され、2011年から、光・赤外線天文学大学間連携事業の観測教育ネットワークOISTER<sup>12)</sup>の一部として活用されている。

天体リストから観測高度、月からの離角を含めた優先度に従い、毎夜自動的に観測を遂行する。2015/11までに1バンドあたり147万フレームを取得した。小惑星の観測は、主たるターゲット観測の隙間時間で実施している。50-cm望遠鏡を使用した小惑星の研究論文として、Urakawa et al.(2011)<sup>13)</sup>やHasegawa et al.(2013)<sup>14)</sup>が出版された。

### 3.1 地球近傍小惑星の観測

観測好機に限られる地球近傍小惑星の観測にとって、 $g'$ 、 $R_c$ 、 $I_c$ の3バンドが同時に測光できることは有利な点である。3色ライトカーブやその色差を評価するために必要なフラックス( $S/N > 50$ )を得るには、15V等級より明るくなるタイミングが観測好機である。一般に、地球近傍小惑星が明るくなる時は、恒星時に比較して高速に動く。図6は、地球に大接近した地球近傍小惑星のうち、50-cm望遠鏡によって観測に成功した例を示した。これらの小惑星は、天候不良などの理由で連続的に観測できず、研究目的には利用できなかった。

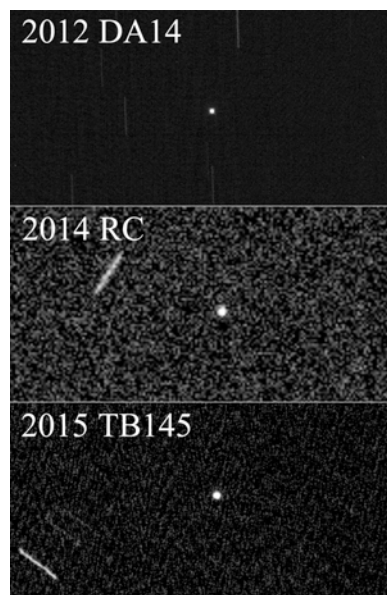


図6 50-cm望遠鏡による地球近傍小惑星の観測例。2012 DA14(上)は2013年2月16日、2014 RC(中)は2014年9月7日、2015 TB145(下)は2015年10月31日に観測した。

### 3.2 イメージサブトラクション法による測光

図6でも分かるように、小惑星に合わせて望遠鏡を駆動することで、小惑星は点像、背景の恒星は伸張した画像が得られる。これまでライトカーブを得る目的で相対測光をするときは、このように伸張した恒星に大きいアパーチャで測光する手法で行ってきた。アパーチャを大きくすると、ホットピクセルや宇宙線イベントなどのコンタミネーションの要因にもなった。

このような場合にも有効な解析手法として、小惑星の観測フレームにイメージサブトラクション法を利用した測光を導入した。元々、イメージサブトラクション法は、超新星などの時間変動天体の検出手法として発展してきた。本研究では、Andrew Becker氏によって開発されたソフトウェアであるHOTPANTSとWCSRemapを使用した<sup>15)</sup>。WCSRemapによって、ターゲットフレームと基準フレームの位置合わせを行い、HOTPANTSがPSF(Point Spread Function)マッチングと



画像引算を行う。小惑星観測フレーム(図7a)から、別の夜に同じフィールドを観測した基準フレーム(図7b)を引算した結果を図7cに示した。サブトラクションした星は引き残りがあがるが、ほとんどの背景星がなくなるので、アパーチャ測光時のコンタミネーションの心配がなくなる。小惑星と恒星が数ピクセルと近接した場合にも、恒星が消せるのでアパーチャ測光を適用できる。また、恒星時追尾で観測した基準フレームを使ったゼロ点較正が定量的にできるため、後日測光夜に標準星を使ってフィールドの較正をすることで絶対値も算出し易い。一方で、解析処理が複雑になることと追加の観測時間が必要なことが短所である。

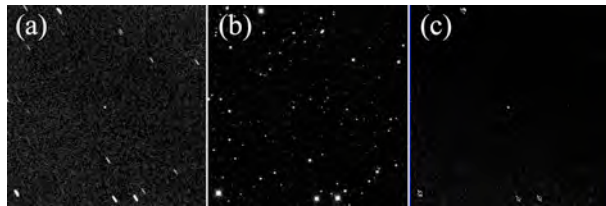


図7 イメージサブトラクション法による差分画像  
それぞれ、(a)は小惑星フレーム(小惑星追尾)、(b)は基準フレーム(恒星時追尾)、(c)は差分画像を示す。

### 3.3 (357439) 2004 BL86の3バンドライトカーブ

最新の観測成果として、地球近傍小惑星(357439) 2004 BL86の3バンド同時観測について報告する。2004 BL86の最接近は2015年1月26日であったが、50-cm望遠鏡による観測は、2015年1月28日(20秒露出377枚、6.68時間)、31日(120秒露出168枚、6.55時間)に実施した。どちらも大気分散の影響が小さい天頂距離が40度以下でのみ観測を行った。

これら2夜のデータについて、3.2節で記述したイメージサブトラクション法を使用してアパーチャ測光を行った。図8はRcバンドのライトカーブである。まだ詳細な解析中であるが、1月28日と31日のデータで位相のずれが見えている。generalised Lomb-Scargle periodogram<sup>16)</sup>による周期解析の結果 $2.6865 \pm 0.0003$ 時間と得られた。1晩で2周期分以上の観測スパンがある。これは先行研究<sup>17)</sup>の $2.637 \pm 0.024$ 時間に近い結果であった。

$g'$ 、Rc、Icで得られたライトカーブは、同時に観測しているので単純に差分を得ることができる。図9は、色差 $g'-Rc$ 、 $g'-Ic$ を縦軸に、自転位相を横軸としてプロットした。 $g'-Rc$ は自転位相0.48あたりに赤くなる傾向がみられるが、1月28日と1月31日のデータを比較するとその大きさの再現性がないようだ。一方、 $g'-Ic$ は顕著な変動はみられなかった。図8で示したように両日の自転位相がずれていることもあり、もう少し丁寧な評価が必要である。

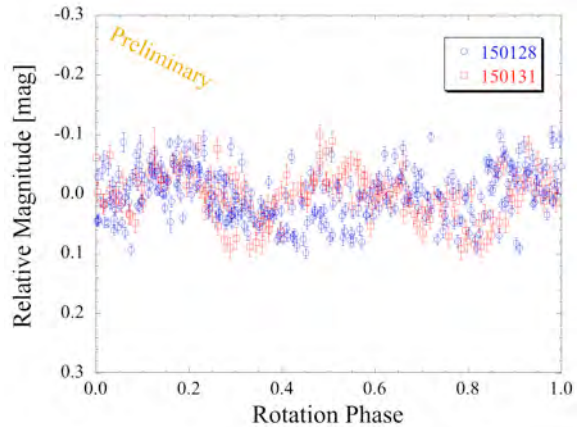


図8 2004 BL86のRcバンドのライトカーブ  
縦軸は相対等級、横軸は自転位相を示す。周期解析で求めた $2.6865 \pm 0.0003$ 時間で折りたたんだ自転位相である。青丸は2015年1月28日のデータ、赤四角は2015年1月31日のデータを表す。

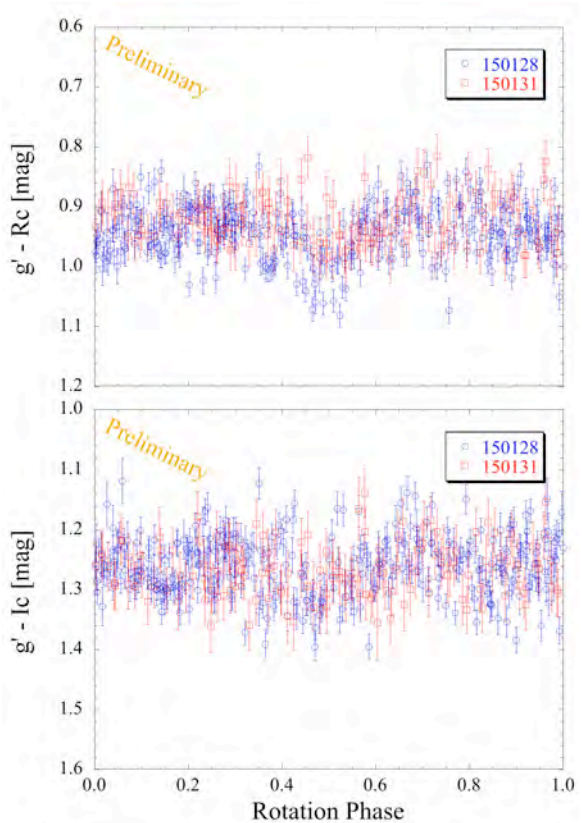


図9 2004 BL86の自転位相に伴う色差  
縦軸は色差 $g'-Rc$ (上)と $g'-Ic$ (下)、横軸は周期2.6865時間の自転位相を示す。青丸は2015年1月28日のデータ、赤四角は2015年1月31日のデータを表す。

## 4 まとめ

上述してきたように、岡山天体物理観測所では、小惑星の測光や分光を行うことが可能な望遠鏡と観測装置がある。KOOLSとISLEは同時に使用できないが、併

用することで、0.49-2.37 $\mu\text{m}$ まで広い波長域のデータが取得できる。さらに、50-cm望遠鏡による多色ライトカーブを得ることで、小惑星表面のどの場所を観測したかが明確に分かる。

このように、1天体で論文化するような研究成果につなげるためには、いくつかの望遠鏡あるいは施設が連携して多モードの観測が必要である。

#### 謝辞

本研究は、MITSuMEプロジェクトおよび光・赤外線天文学大学間連携事業のサポートを受けている。

#### 参考文献

- 1) Yoshida, M. et al., Current Status of the Instruments, Instrumentation and Open Use of Okayama Astrophysical Observatory, JKAS, 38, 2, pp. 117-120, 2015
- 2) Yanagisawa, K., et al., ISLE: a general purpose near-infrared imager and medium-resolution spectrograph for the 1.88-m telescope at Okayama Astrophysical Observatory, Proceedings of the SPIE, 6269, 62693, 12pp., 2006.
- 3) Yanagisawa, K., et al., ISLE: near-infrared imager/spectrograph for the 1.88m Telescope at Okayama Astrophysical Observatory, Proceedings of the SPIE, 7014, 701437, 12 pp, 2008.
- 4) Kotani, T., et al., MITSuME---Multicolor Imaging Telescopes for Survey and Monstrous Explosions, NCimC, 28, 4, p.755, 2005.
- 5) Yanagisawa, K., et al., Six years of GRB follow up with MITSuME Okayama Telescope, AIP Conference Proceedings, 1279, pp. 466-468, 2010.
- 6) Bus, S. J. and Binzel, R. P., Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: A Feature-Based Taxonomy", Icarus 158, pp. 146-177, 2002.
- 7) DeMeo, F.E., et al., An Extension of the Bus Asteroid Taxonomy into the Near-Infrared. Icarus 202, pp. 160-180, 2009.
- 8) Kuroda, D. et al., Visible-wavelength spectroscopy of subkilometer-sized near-Earth asteroids with a low delta-v, PASJ, 66, 3, id.51, pp.1-10, 2014.
- 9) Hasegawa et al., The opposition effect of the asteroid 4 Vesta, PASJ, 66, 5, id.89, 18pp, 2014.
- 10) 黒田大介, 他, ISLEによる小惑(349)Dembowskaの低分散分光観測, 2009年度岡山ユーザーズミーティング集録, pp.179, 2009.
- 11) Abell, P. A. and Gaffey, M. J., Probable Geologic Composition, Thermal History, and Meteorite Affinities for Mainbelt Asteroid 349 Dembowska, 31st LPSC, 1291, 2000.
- 12) 関口和寛, 大学間連携による光・赤外線天文学研究教育拠点のネットワーク構築, 天文月報, 109, 2, pp.85-91, 2016.
- 13) Urakawa, S. et al., Photometric observations of 107P/Wilson-Harrington, Icarus, 215, 1, pp.17-26, 2011.
- 14) Hasegawa et al., Lightcurve survey of V-type asteroids in the inner asteroid belt, 66, I3, id.54, 15pp, 2014.
- 15) Becker, A., [http://www.astro.washington.edu/users/becker/v2.0/c\\_software.html](http://www.astro.washington.edu/users/becker/v2.0/c_software.html)
- 16) Zechmeister M. and Kürster M., The generalised Lomb-Scargle periodogram, A&A, 496, pp.577-584, 2009.
- 17) Birlan, M., et al., Characterization of (357439) 2004 BL86 on its close approach to Earth in 2015, A&A, 581, A3, 7pp., 2015.

(2016年1月21日受付, 2016年1月30日受理)