

## 高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の可視分光観測

岩井 彩<sup>1)</sup>・伊藤 洋一<sup>2)</sup>・寺居 剛<sup>3)</sup><sup>1)</sup> 神戸大学 <sup>2)</sup> 兵庫県立大学 <sup>3)</sup> 国立天文台

## Optical Spectroscopy of Highly Inclined Main-Belt Asteroids

Aya IWAI<sup>1)</sup>, Yoichi ITOH<sup>2)</sup> and Tsuyoshi TERAI<sup>3)</sup>

## Abstract

Highly inclined main-belt asteroids are generally believed to be born in the ecliptic plane and scattered by gravitational perturbations. In order to identify the cause of the perturbations, we conducted optical spectroscopy of highly inclined D-type main-belt asteroids. We found that the highly inclined D-type main-belt asteroids are more populous than the less inclined main-belt asteroids. This abundant population suggests gravitational scattering events during the formation process of the Solar system.

Key Words: main-belt asteroid, optical spectroscopy

## 1 イントロダクション

軌道が確定した小惑星の約9割はメインベルトと呼ばれる、太陽から2.1-3.3AU離れた環状の領域に分布する。ほとんどのメインベルト小惑星は軌道傾斜角が小さく、黄道面領域を公転する。また、小惑星は組成を反映する可視光波長域のスペクトル形状から複数のスペクトル型に分類<sup>1)2)</sup>されており、メインベルト内の空間分布は型ごとに異なる。2.1-2.6AU辺りにはS型が多く、2.6-3.3AU辺りになるにつれてC型が支配的になる。3.3-5.2AU辺りではD型小惑星が増えてくる。メインベルト内では、高軌道傾斜角を持つ小惑星が分布する。林モデル<sup>3)</sup>をはじめとする太陽系形成モデルによれば太陽系内の天体は原始惑星系円盤から形成されるため、これらは円盤面(現在の黄道面)付近に分布するはずであり、現在の高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の空間分布を説明できない。よってこれらのメインベルト小惑星は、元々黄道面付近で形成された後、重力摂動を受けて軌道傾斜角が増大したと考えられる。この重力摂動には2つの説がある。

木星と土星の永年共鳴移動による、小惑星の軌道進化過程が数値計算されている<sup>4)</sup>。彼らの計算では、木星と土星(共に現在の質量)、無質量の小惑星、木星付近で空隙を持つ星雲ガスを用意し、太陽系内側から外側へと散逸するガス端を $1 \times 10^{-5}$  AU/yrで移動させた。この計算では、太陽星雲ガス散逸による永年共鳴の移動により、小惑星は同じ軌道長半径を保ちながら、軌道離心率・軌道傾斜角が増大した。

また、原始惑星とその周辺に分布する微惑星の、ランダム速度と空間分布の時間進化過程が数値計算されている<sup>5)</sup>。彼らの計算では、原始惑星(Mass= $2 \times 10^{23}$ kg,  $e, i=0.01, a=1$  AU)、微惑星( $M_{\text{total}}=2 \times 10^{21}$ kg,  $(e_m^2)^{1/2}, (i_m^2)^{1/2} \sim 0.01$ )を用意し、微惑星は原始惑星周辺でランダムに分布させた。この計算では、原始惑星による重力散乱によって、微惑星は原始惑星から離れるように軌道長半径が増減し、軌道傾斜角が増大した。

そこで、小惑星がより強く受けた重力摂動を特定するために、D型メインベルト小惑星の空間分布に注目する。D型メインベルト小惑星の軌道長半径分布が黄道面付近と高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星とで等しければ、高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星は永年共鳴によって散乱されたと考えられる。一方、D型メインベルト小惑星が黄道面付近より高軌道傾斜角を持つ小惑星で多く分布するならば、高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星は重力散乱を受けたと考えられる。高軌道傾斜角を持つD型メインベルト小惑星の軌道長半径分布は、メインベルト小惑星の起源と軌道進化過程を理解する手がかりになる。

以上より、高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の可視分光観測を行い、得られたスペクトルを基に分類を行う。そしてD型メインベルト小惑星の軌道長半径分布を黄道面付近と高軌道傾斜角を持つ小惑星とで比較し、重力摂動と軌道進化過程を議論する。

## 2 観測

本研究では、軌道傾斜角10度以上を高軌道傾斜角とする。観測は2台の望遠鏡、ハワイ大学2.2m望遠鏡とインドIUCAA2m望遠鏡を用いた。ハワイ大学では2008年10月30, 31日、2011年10月19, 20日に観測を行った。装置はWFGS2<sup>6)</sup>を用い、低分散グリズムを使った。その波長分解能は $0.65 \mu\text{m}$ で410であり、1ピクセルあたり0.38nmをカバーする。フィルターは $0.435 \mu\text{m}$ より長波長の光を通すOrder-sort1を使用し、スリット幅は $1.4''$ であった。また、有効波長域は $0.44-0.83 \mu\text{m}$ であり、積分時間は180-600秒であった。インドIUCAAでは2008年12月28, 29日に観測を行った。装置はIFOSC<sup>7)</sup>を用い、IFOSC5グリズムを使った。その波長分解能は $0.60 \mu\text{m}$ で650であり、1秒角あたり0.92nmをカバーする。また、

波長域は0.52-1.03  $\mu\text{m}$  であり、積分時間は300-600秒であった。観測天体は、軌道長半径が2.1-3.3au、軌道傾斜角が10度以上、観測日に観測可能な明るさ(V等級)を持つ天体を選び、SDSS-MOC4の測光観測データからスペクトル型がD型と思われる天体から優先的に観測した。観測天体の空間分布を図1に示す。高軌道傾斜角を持つ64天体、スペクトル確認用として黄道面付近に分布する3天体の合計67天体の画像を取得した。

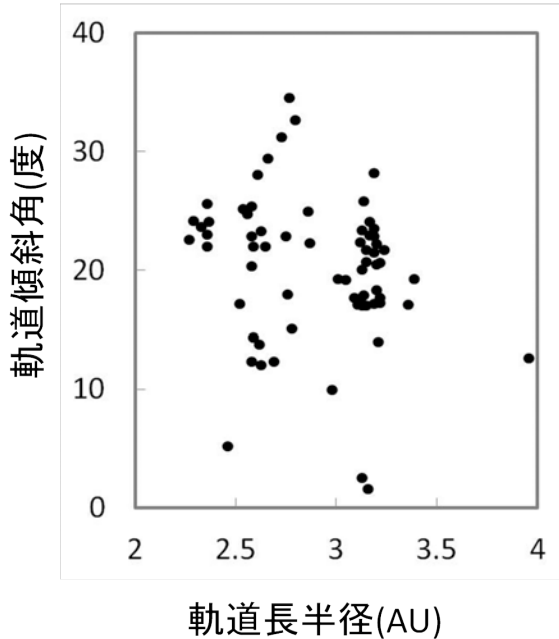


図1 観測天体の空間分布

### 3 解析

解析には IRAF を用いた。ハワイ大学で取得した画像では以下の手順で行った。まず、オーバースキャンの差し引き、バイアスとフラットの処理、宇宙線やパッドピクセルを除去した。

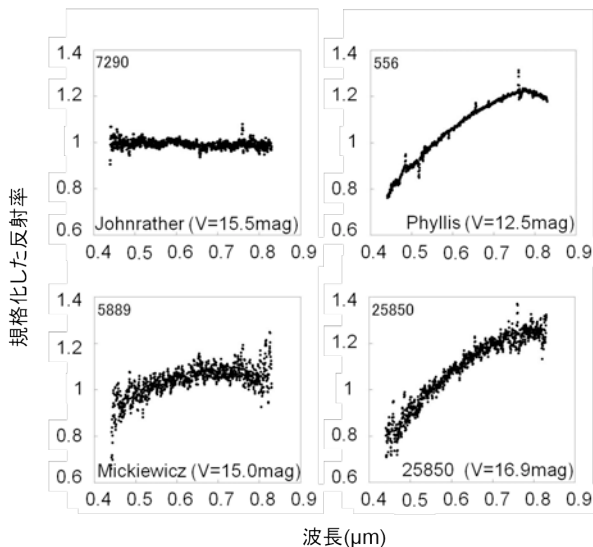


図2 取得したスペクトル(一部)

次に大気スペクトル<sup>8)</sup>を用いて波長同定後、背景光除去処理を行った。その後、処理後の画像から1次元の天体スペクトルを抽出した。最後に、G型恒星のスペクトルを使って小惑星のスペクトルから除算し、0.55  $\mu\text{m}$  で規格化の後、スムージングをかけた。インド IUCAA で取得した画像では以下の手順で行った。まず、バイアスとフラットの処理、宇宙線やパッドピクセルを除去した。その後、処理後の画像から1次元の天体スペクトルを抽出し、Ne-Ar 灯を用いて波長同定、G型星を用いた標準星補正と規格化の後、スムージングをかけた。取得した天体画像ごとにフリッジ模様の伸縮が見られたため、フリッジが写ったフラット画像を波長方向の伸縮具合に合わせて加工し、フリッジ画像を作成した。そして天体画像からフリッジ画像を除算する処理を行った。

## 4 結果

### 4.1 スペクトル分類

解析後の小惑星67天体のスペクトルの一部を図2に示す。横軸は波長( $\mu\text{m}$ )、縦軸は0.55  $\mu\text{m}$  で規格化した反射率である。S/N比は50-70辺りのスペクトルが多い。これらのスペクトルを SMASS II<sup>1)2)</sup>で得られたスペクトルと比較することで、小惑星のスペクトル型を分類した。SMASS II<sup>1)2)</sup>のスペクトルは波長範囲が0.435-0.925  $\mu\text{m}$ 、波長分解能が約100である。著者らはこれらのスペクトルを用いて、0.44-0.92  $\mu\text{m}$ の波長範囲を9つに分け、スペクトル型ごとに平均値と標準偏差を計算した。私たちは平均値を用いて S, C, X, D, V型ごとに基準(平均)スペクトルを作成した。なお、区域間の値は線形近似を用いて求めた。各スペクトル型の0.55  $\mu\text{m}$  で規格化した反射率の標準偏差は、S型は0.023、C型は0.017、X型は0.019、D型は0.019、V型は0.041である。次に、小惑星スペクトルと基準スペクトルとの規格化した反射率の差を波長域内の波長ごとに計算し、この差が最小になる型をその小惑星のスペクトル型とする。使用した波長域は UH88 で0.44-0.83  $\mu\text{m}$ 、IUCAA で0.52-0.92  $\mu\text{m}$ である。また、最小の差が平均0.07以上になるスペクトルは除外する。各スペクトル型のサブタイプ(例えばS型なら Sa, Sk, S1 など)の多様性を考慮するために、除外基準値を各基準スペクトル標準偏差の平均値の3倍より高い0.07とした。このような方法で、67天体中38天体(高軌道傾斜角を持つ天体は35天体)のスペクトル型を決定した。38天体の内訳は、S型は9天体、C型は16天体、X型は5天体、D型は8天体、V型は0天体であった。

### 4.2 D型メインベルト小惑星の空間分布

まずは測光観測データを用いて、D型候補天体数を求める。測光データを使う理由は、本研究で行った観測時に測光データからD型と思われる小惑星を優先的に観測したため、D型に偏った天体選択を正して割合を計算するためである。この補正後に軌道傾斜角別の存在割合を求め、これらの軌道長半径分布を議論する。SDSS-MOC4で測光観測(g, r, i フィルター)が行われている、軌道長半径が2.1-3.3auの天体の中で、軌道傾斜角が10度未満の黄道面付近の天体は67921天体、10度以上の高軌道傾斜角の天体は31396天体であった。g-r, r-iのカラー図でC型とD型の区別が可能<sup>9)</sup>な

め、 $g-r \geq 0.5$ ,  $r-i \geq 0.2$  内の領域を D 型候補領域とした。D 型候補領域に位置する、黄道面付近の天体は 67921 天体中 26261 天体、高軌道傾斜角を持つ天体は 31396 天体中 11786 天体であった。

また、D 型候補領域内で分光観測によりスペクトル型が既知の天体数を SMASS II<sup>1)2)</sup>、S<sup>3</sup>OS<sup>2)10)</sup> の分光データと本研究から求めると、黄道面付近の天体は 103 天体、高軌道傾斜角の天体は 67 天体であった。なお、これらは D 型候補天体であり、D 型のみのものである。最後に D 型候補領域内でスペクトル型既知天体の中で、D 型に分類される天体数は黄道面付近で 103 天体中 8 天体、高軌道傾斜角で 67 天体中 13 天体であった。なお、今回 SDSS-MOC4 で測光観測が行われている小惑星のみを考察対象としたため、本研究で分光観測したが測光値が分からない高軌道傾斜角を持つ 19 天体は考察対象に入れていない。

以上の数値から、メインベルト全体に占める D 型小惑星の存在割合を求める。黄道面付近の存在割合は、 $(26261/67921) \times (8/103) \times 100 = 3.0 \pm 1.1\%$ 、高軌道傾斜角での存在割合は、 $(11786/31396) \times (13/67) \times 100 = 7.2 \pm 2.1\%$  であった。

## 5 考察とまとめ

軌道長半径が 2.1-3.3au 内にある D 型メインベルト小惑星の空間分布は、黄道面付近 ( $i < 10$ ) では  $3.0 \pm 1.1\%$ 、高軌道傾斜角 ( $i \geq 10$ ) では  $7.2 \pm 2.1\%$  であった。これより高軌道傾斜角を持つ D 型メインベルト小惑星は、黄道面付近より多く分布することがわかった。黄道面付近の D 型小惑星はメインベルト外側からメインベルト外縁領域に多く分布することから、この領域で形成された小惑星が重力散乱によって軌道長半径が増減し、軌道傾斜角が増大したことを示唆する。

## 参考文献

- 1) Bus, S. J., and Binzel, R. P. 2002, *Icarus*, 158, 106
- 2) Bus, S. J., and Binzel, R. P. 2002, *Icarus*, 158, 146
- 3) Hayashi, C., Nakazawa, K., and Nakagawa, Y. 1985, in "Protostars and planets II", 1110
- 4) Nagasawa, A., Tanaka, H., and Ida, S. 2000, *AJ*, 119, 1480
- 5) Ida, S., and Makino, J. 1993, *Icarus*, 106, 210
- 6) Uehara, M. et al. 2004, *Proc. SPIE*, 5492, 661
- 7) Gupta, R. et al. 2002, *BASI*, 30, 785
- 8) Osterbrock, D. E., and Martel, A. 1992, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 104, 76
- 9) Ivezić, Z. et al. 2001, *AJ*, 122, 2749
- 10) Lazzaro, D. et al. 2004, *Icarus*, 172, 179

(2012年11月27日受付, 2013年1月15日受理)