

木星トロヤ群小惑星のサイズ分布から探る太陽系史

吉田 二美

国立天文台

An insight into the solar system history through the size distribution of Jupiter's Trojans

Fumi YOSHIDA

Abstract

We examined the size distributions of small L4 and L5 Jupiter's Trojans (JTs) detected in Subaru Main Belt Asteroid Survey and found the different cumulative size distributions between the L4 and L5 Trojans with the size range of 2km to 5km in diameter. We made a new surface number density distribution model for JTs around the L4 or L5 libration point of Jupiter derived from numerical integrations of orbital motions for actual Trojan asteroids around L4 point. With this model, we estimate the total populations of L4 and L5 Trojans with $D > 2\text{km}$ and confirmed the asymmetry of L4 and L5 populations which has been a concern among many researchers. Recent SDSS also provided the size distribution and the total population of L4 and L5 Trojans with $D > 10\text{km}$.

In this paper, based on the newly obtained size distributions and total populations of L4 and L5 JTs and existing theoretical researches, we would like to discuss the formation process of JTs in the history of the solar system.

Key Words: Asteroid, Jovian Trojans, Solar System

1 木星トロヤ群小惑星について

木星トロヤ群は太陽から平均5.2AUの距離にあり、木星軌道上で木星の前後 60° 離れたところに群れている二つの天体群である。木星の前方がL4群、後方がL5群と呼ばれる。木星トロヤ群小惑星は1906年に最初の一個がL4群に発見されてから現在に至るまでに約2300個が確認されているが、これらの天体に関する我々の知識は未だ乏しく、起源や総質量、組成等わかってないことが多い。

トロヤ群の起源については、現在以下の3つの説がある。(1) 木星集積期に木星付近にあった微惑星がトロヤ群軌道に捕獲された⁽¹⁾⁽²⁾。(2) 木星トロヤ群の大部分は長期間にわたってメインベルトや太陽系外縁部からの散乱天体が捕獲されたものである⁽³⁾。(3) 現存する木星トロヤ群は土星と木星の1:2平均運動共鳴通過後に捕獲された天体である⁽⁴⁾。これまでのところどの説が正しいのか、決め手はなかった。

木星トロヤ群の2つの群れの数が違っていること(L4群が多くて、L5群が少ない)は古くから気づかれていた。制限三体問題ではL4、L5点付近の軌道の安定性は同等であるから、2つの群れの数の違いは観測バイアスであろうと言われていた。しかし果たしてそうなのか?これまでのところ未解決であった。

木星トロヤ群の表面に水が検出されないことも不思議なことと思われる。多色測光や分光観測によれば、木星トロヤ群は非常に均一で、大部分の天体が彗星核に良く似たD型のスペクトルを示す。しかしながら彗星に似た組成なら当然ありそうな水の吸収は見つからない⁽⁵⁾。トロヤ群の表面は長年の宇宙風化のため水はもう残っていないが、内部にはきっと水が隠れているのではと見る向きもある。ならば衝突で形成されたと考えられるトロヤ群の小惑星族⁽⁷⁾の小惑星なら、表面に母天体の内部物質が見られるかと期待されたが、

絶対等級9等までの族の小惑星のスペクトルを得た Dotto, et al. (2006)⁽⁶⁾の観測では、水の吸収は見つからなかった。

以上のようにいろいろな未解決の問題を抱えている木星トロヤ群小惑星だが、最近SDSS⁽⁷⁾とすばる望遠鏡による太陽系小天体サーベイのデータの分析から、広いサイズ範囲にわたって木星トロヤ群小惑星のサイズ分布が得られた。また系統的なサーベイを通じてのL4群とL5群の小惑星の数も推定された。こうして、これまでの理論的研究に加えて、トロヤ群の起源を考察するに十分な観測的材料が揃って来た。

ここでは我々の行ったすばる望遠鏡による太陽系小天体サーベイのデータ分析とSDSSの結果を紹介し、これら最新のデータを使って得た木星トロヤ群小惑星のサイズ分布や、総人口の調査から推察されるトロヤ群形成のシナリオについて考えてみたい。

2 木星トロヤ群小惑星のサイズ分布

2.1 すばるメインベルト小惑星サーベイ (SMBAS) で検出されたトロヤ群小惑星とそのサイズ分布

我々はハワイ島マウナケアの口径8.2mのすばる望遠鏡を使った太陽系小天体のサーベイ観測を2001年から行っており、大口径の望遠鏡でしか見えない微小天体のサイズ分布や空間分布を明らかにするために貢献して来た⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。このサーベイでは約3000個の太陽系小天体が検出され、そのうち木星トロヤ群小惑星は、一回目のサーベイの時にL4群が51個検出された。二回目のサーベイではL5群が62個検出された(図1)。検出した天体の中からトロヤ群天体を移動速度に基づいて抽出し、移動速度から天体までの距離を算出する。そして、見かけの明るさの情報と合わせて、以下の手順で各天体の直径を推定し、最終的にサイズ分布を得る。

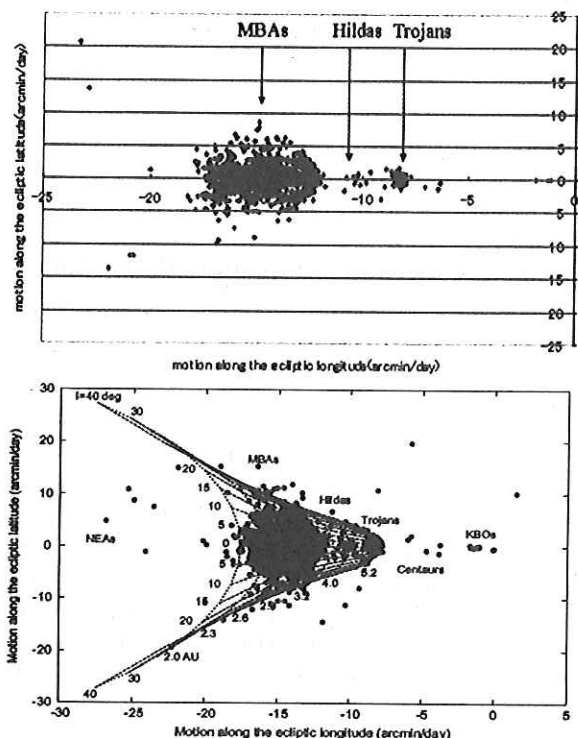


図1 上：一回目のサーベイ (SMBAS-I) で見つけた太陽系小天体を黄経方向と黄緯方向の速度成分でプロットしたもの。下：二回目のサーベイ (SMBAS-II) で検出した天体。衝の位置で観測すると、地球と移動天体の相対速度の違いで図のように小天体をグループ分けすることができる。

<手順>

- (1) 角速度 → 日心距離, i.e. 軌道長半径 (a) ($e=0$ と仮定)を得る。
- (2) 見かけ等級(m_R) と a → 絶対等級 (H) ($e=0$ と仮定)を次式より得る。

$$H = m_R - 5 \log(a(a-1))$$

- (3) H → 直径 (D km) へ次式により換算する。

$$\log D \text{ (km)} = 3.13 - 0.5 \log A - 0.2 H$$

この時仮定したアルベド (A) は以下のとおり。 $A=0.09$

--- SMBAS-I, $A_S=0.21$ (S-type), $A_C=0.04$ (C-type) ---
SMBAS-II.

図2は検出された木星トロヤ群の軌道長半径と見かけ等級のプロットで、これを見ると、両サーベイとも検出限界は約24等 (Rバンド)とわかる。この明るさはトロヤ群小惑星の直径に換算すると約2kmになる。

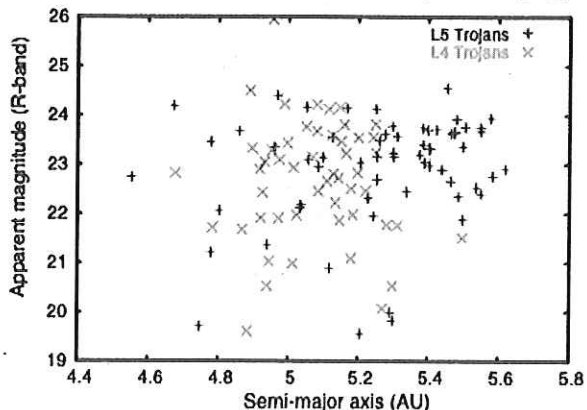


図2 ×がL4群、+がL5群

図3にすばる望遠鏡のサーベイで得られた木星トロヤ群のサイズ分布を示した。小惑星のサイズ分布はふつう累積サイズ分布 ($N(>D) \propto D^{-b}$) で評価されることが多い。直径 D より大きいものが何個あるかという統計を取り、べき乗分布で近似して、インデックスの値が大きければ、小さい小惑星ほど急激に増加しているということ、その値が小さければ、小さい小惑星の数はあまり増えていないことを示す。L4群 (図3上図) では $D=5\text{km}$ を境に b の値が変化し、 $5\text{km} < D < 10\text{km}$ では $b=2.4 \pm 0.1$ 、 $2\text{km} < D < 5\text{km}$ では $b=1.3 \pm 0.1$ であった。一方、L5群 (図3下図) では、 $2\text{km} < D < 5\text{km}$ で $b=2.1 \pm 0.3$ であった。L5群では $D>5\text{km}$ の小惑星の検出数が少ないが、L4群で見られた $D=5\text{km}$ 出の折れ曲がりは見られないようである⁽¹²⁾。

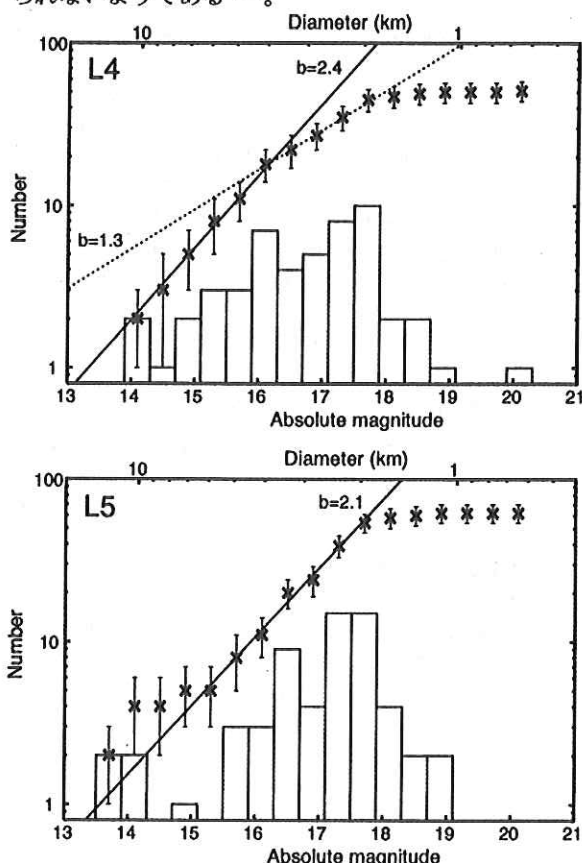


図3 すばる望遠鏡の小天体サーベイで得られた木星トロヤ群小惑星のサイズ分布 (上:L4群、下:L5群)。下横軸は絶対等級で、換算された直径は上横軸に示した。縦軸はその明るさの小惑星の数で、棒グラフは頻度分布、×が累積分布である。 b の値はべき乗分布のインデックスに相当する値。

2.2 既知のトロヤ群+SDSS+Jewittらのサーベイ+すばるのサーベイで得られたトロヤ群小惑星のサイズ分布

狭いサイズ範囲ではトロヤ群天体全体のサイズ分布の特徴がわからないので、カタログにある既知のトロヤ群小惑星とこれまでのサーベイで得られたトロヤ群小惑星の累積サイズ分布を表1にまとめた。表1で

SMBASとあるのが、すばる望遠鏡によるサーベイから得たものである。この表を見ると、直径5kmより大きいトロヤ群小惑星ではL4群もL5群もbの値は2くらいで大差なく、小さいサイズのL4トロヤ群 (D<5km) だけでbの値が小さいことがわかった。

表1の累積サイズ分布をまとめてL4、L5群それぞれで小惑星のサイズ分布を書くと図4のようになり、直径約200kmから直径5kmまでの広いサイズ範囲で、bの値はL4、L5ともに2.2で、両群のサイズ分布は極めて似ている（ほぼ同一）と言って良く、直径5km以下の小さいトロヤ群だけでL4、L5のサイズ分布に違いが見られるということがわかった。これは広いサイズ範囲でサイズ分布が得られたことで、初めて見えて来た特徴である。

表1 様々なサーベイで得られた木星トロヤ群小惑星のサイズ範囲と累積サイズ分布の傾き (b)

群	b	サイズ範囲 D (km)	References
L4	1.3±0.1	2 < D < 5	SMBAS-I ⁽¹³⁾
	2.4±0.1	5 < D < 10	SMBAS-I ⁽¹³⁾
	2.0±0.3	4 < D < 40	Jewitt et al. (2000) ⁽¹⁴⁾
	2.2±0.25	10 < D < 100	SDSS ⁽⁷⁾
	2.0±0.1	20 < D < 93	既知のトロヤ群
L5	2.1±0.3	2 < D < 5	SMBAS-II ⁽¹²⁾
	2.2±0.25	10 < D < 100	SDSS ⁽⁷⁾
	2.1±0.1	20 < D < 93	既知のトロヤ群

既知のトロヤ群小惑星のカタログ

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/JupiterTrojans.html>

SDSSについてはL4、L5群別には発表されていない。

3 L4、L5木星トロヤ群小惑星の数の比

3.1 すばるメインベルト小惑星サーベイ (SMBAS) から得られたL4/L5

これまでトロヤ群の総人口は、トロヤ群小惑星の空間分布をGaussianでフィットして算出されていたが⁽¹³⁾、既知の木星トロヤ群の空間分布はGaussian分布からはかなり異なる。そこですばる望遠鏡のサーベイでは、トロヤ群の空間分布を黄緯方向と黄経方向に分けて、それぞれGaussianとMaxwellianでフィットするという新しい空間分布モデルを使って、トロヤ群小惑星の数密度から各群の総数が見積もられた⁽¹⁴⁾。すばるの観測で得た数密度は、黄道面上でL4点の32°前方 (14.7±2.3/deg²) とL5点の22°後方 (13.8±1.9/deg²) の2点だけなので、他はモデルで補ってやる。そうすると、得られた各群の総数は、サーベイの検出限界にあたる直径2kmより大きいトロヤ群小惑星について、L4群が6万3千個、L5群が3万4千個であった⁽¹⁴⁾。L4群とL5群の数の比は、誤差範囲も入れると1.3~2.5となる。つまりL4群の方が数が多いという、古くからの指摘を確認する結果となった。

3.2 SDSSから得られたL4/L5

SDSSではすばるのサーベイで検出されたトロヤ群

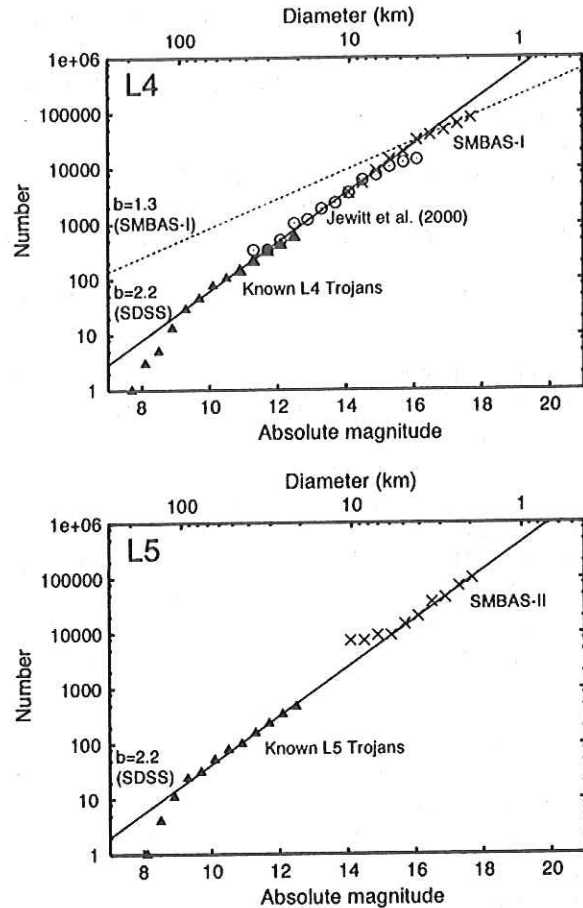


図4 木星トロヤ群小惑星のカタログと様々なサーベイから得られた直径約200kmから直径2kmまでの木星トロヤ群の累積サイズ分布 (上: L4群、下: L5群)。SDSSの結果は生のデータはないので、点は打てなかったが、直径10kmより大きい小惑星はb=2.2の直線の傾きになっていると思うとよい。

小惑星よりずっと多い860個のトロヤ群小惑星を使ってL4群とL5群の数の比が見積もられた。それによると、L4/L5=1.6±0.1であった⁽⁷⁾。やはり確実にL4の方が数が多い。既知のトロヤ群小惑星カタログでも同じ傾向が見られる。このようなすばるやSDSSの結果から、L4とL5の数の比はもはや観測バイアスではなく、リアルだと思って良いと思う。

4 L4、L5群別の木星トロヤ群小惑星のサイズ分布と数の比から探るトロヤ群の形成プロセス

4.1 なぜ小さいL4群でサイズ分布の傾きが浅いか?

広いサイズ範囲でL4群とL5群のサイズ分布を比べると (図4)、小さいL4群だけで累積サイズ分布の傾きが異なっていることがわかった。理論的には、もし小さいL4トロヤ群だけが選択的に取り除かれたとすると、このようなサイズ分布を再現できる。では小さいL4トロヤ群だけを選択的に取り除くメカニズムが存在するかというと、現在の太陽系では無理だが、過去そのような状況はあったかも知れない。Peale (1993)⁽¹⁶⁾や Marzari & Scholl (1998)⁽¹⁷⁾らの研究によれば、原始太陽系星雲のガス抵抗の中では、L4天体の軌道が

不安定になり、L5天体の方が生き残りやすいというシミュレーション結果がある。つまり、トロヤ群が形成された時に星雲ガスが残っていれば、L4点よりL5点周りに多くの天体が残ることになる。ガス抵抗は小さい天体にしか効かないので、この効果は大きいトロヤ群では見られない。これはすばる望遠鏡でやっと検出できるような小さい天体だけで、L4群が少なくなっていることの理論的裏付けとして適切ではあるまいか。

4.2 なぜ全体的にはL4群が多くて、L5群で数が少ないか？

Gomes (1998) (17)のシミュレーションによれば、大惑星のマイグレーションは、L5群の天体の軌道を不安定にし、L4群にある天体の方が生き残りやすいとのことである。この数値計算は木星の移動に伴って1:1共鳴が移動して行く中で、天体がトロヤ群からこぼれ落ちて行き、最終的に生き残った数を比べた結果である。共鳴の効果は天体の大きさによらず、すべての天体に有効であるから、惑星移動が起きた前後でサイズ分布の形は変わらないはずである。よって惑星移動が起こった時に形成されていたトロヤ群のサイズ分布の形を変えずに、L5群の数が全体的に減ることになる。この計算結果は、全体的にはL5群の数が少ないというすばるやSDSSの観測結果を説明してくれそうである。

ただし、最近の論文では土星の摂動と入れて計算すると、L4点周りの方がL5点より、軌道の安定領域が広いことがわかった。このことがL4、L5の数の違いに影響しているという説もある (18)。惑星移動だけがL4群とL5群の数の非対称性の要因ではないかもしれない。

4.3 木星トロヤ群の形成プロセス (提案)

以上わかったことから、木星トロヤ群小惑星の形成シナリオを考えてみる。まず第一に、L4とL5群のサイズ分布が広いサイズ範囲にわたってほぼ同じであることがわかったので、これは、おそらく、L4、L5の二つのトロヤ群は太陽系の同じような領域で同じように形成されたことを示すと思われる。木星の前後で微惑星のサイズ分布が違うとは考えにくいから、Marzari & Scholl (1998) (1)や Fleming & Hamilton (2000) (2)の言うように、木星付近の微惑星がトロヤ群になったというのが適切ではないだろうか？もしJewitt (1996) (3)の言うように、太陽系のあちこちから散乱天体が寄せ集められてトロヤ群ができたとすれば、寄せ集めが偶然同じサイズ分布になるのは、完全否定は出来ないが、可能性はかなり低いと思われる。またMorbidelli et al. (2005) (4)の言うように、トロヤ群が再構築された場合も、完全にL4とL5が同じサイズ分布を持つように再構築するのは難しいのではないだろうか。実際いくつかの太陽系小天体のグループでは互いにサイズ分布が異なっていることはわかっているので (図5)、異なるグループの天体が混同されると、サイズ分布は変わって来ると思われる。

小さいL4トロヤ群で累積サイズ分布の傾きが浅いのは、原始太陽系星雲がまだ残っている間にトロヤ群が形成されたと考えれば説明できるので、原始太陽系星雲のガス抵抗の中で、小さいトロヤ群小惑星のサイズ分布にL4とL5で非対称が生じていたのであろう。

全体的にL4群の方が数が多いのは、星雲ガスの消失

かなにかをきっかけに、大惑星のマイグレーションが起こって、共鳴帯の移動とともに、軌道が不安定になりやすいL5群の小惑星の方がぐんと減ってしまったので、現在はL4群の方が数が多くなっていると考えられることができる。

つまり、木星トロヤ群の形成プロセスは以下のようになる。

- (1) 木星集積期に周囲の微惑星がトロヤ群軌道に取り込まれる。
- (2) この時原始太陽系星雲はまだ木星周辺に残っていると思われるので、ガス抵抗のため小さいL4トロヤ群が取り除かれ、L4、L5のサイズ分布に非対称が生じた。
- (3) 惑星移動に伴う1:1共鳴帯の移動により、L5のトロヤ群小惑星の数が全体的に減少した。

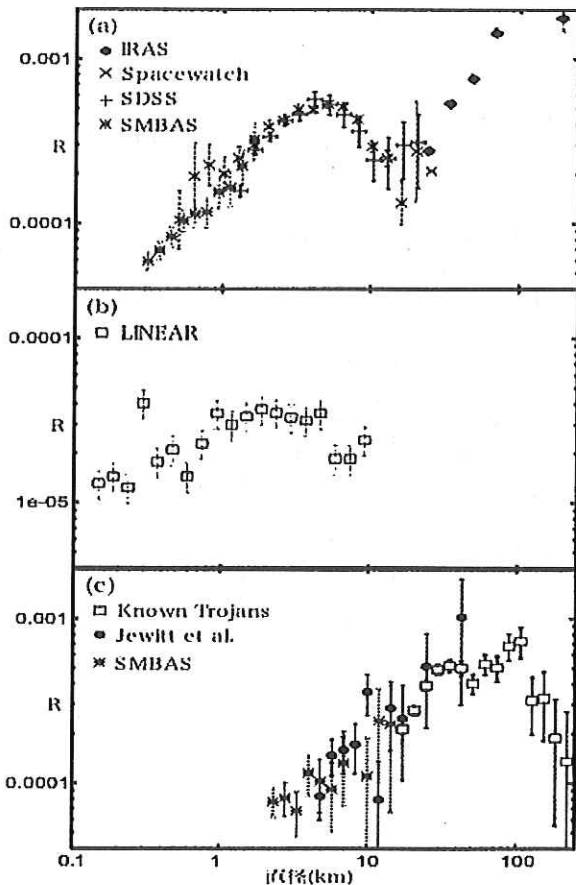


図5 太陽系小天体のグループ別のサイズ分布 (上: メインベルト小惑星、中央: 近地球小惑星、下: 木星トロヤ群小惑星)。縦軸はRプロットと呼ばれるある基準に対する相対的な小惑星の数。それぞれのグループでサイズ分布は異なっていて、個性的である。

参考文献 (記入例)

- 1) Marzari, F. & Scholl, H., *Icarus*, 131, 41, 1998.
- 2) Fleming, H. J. & Hamilton, D. P., *Icarus*, 148, 479, 2000.
- 3) Jewitt, D. C., *Earth, Moon & Planets*, 72, 185, 1996.
- 4) Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., & Gomes, R., *Nature*, 435, 462, 2005.

- 5) Dotto, E., Fornasier, S., Barucci, M.A., Licandro, J., Boehnhardt, H., Hainaut, O., Marzari, F., de Bergh, C., & De Luise, F., *Icarus*, 183, 420, 2006.
- 6) Beauge, C. & Roig, F., *Icarus*, 153, 391, 2001.
- 7) Szabo, Gy. M., Ivezić, Z., Juric, M., & Lupton, R., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 377, 1393, 2007.
- 8) Yoshida, F., Nakamura, T., Fuse, T., Komiyama, Y., Yagi, M., Miyazaki, S., Okamura, S., Ouchi, M., & Miyazaki, M., *PASJ*, 53, L13, 2001.
- 9) Yoshida, F., Nakamura, T., Watanabe, J., Kinoshita, D., Yamamoto, N., & Fuse, T., *PASJ*, 55, 701, 2003.
- 10) Yoshida, F. and Nakamura, T., *Advances in Space Research*, 33, 1543-1547, 2004.
- 11) Yoshida, F. & Nakamura, T., *Planetary and Space Science*, 55, 1113, 2007.
- 12) Yoshida, F., & Nakamura, T., *PASJ* in press, 2008.
- 13) Yoshida, F., & Nakamura, T., *AJ*, 130, 2900, 2005.
- 14) Jewitt, D. C., Trujillo, C. A., & Luu, J. X., *AJ*, 120, 1140, 2000
- 15) Nakamura & Yoshida *PASJ* in press, 2008.
- 16) Peale, S. J., *Icarus*, 106, 308, 1993.
- 17) Gomes, R. S., *AJ*, 116, 2590, 1998.
- 18) Freistetter, F., *A&A*, 453, 353, 2006.

(2008年3月22日受付, 2008年6月15日受理)