

## 太陽系の果てを探る

木 下 大 輔

〈総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: Kinoshita.Daisuke@nao.ac.jp

山 本 直 孝

〈東京理科大学 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3〉

e-mail: yamamoto@kwbtjets.ph.kagu.sut.ac.jp

布 施 哲 治

〈国立天文台 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI, 96720 U.S.A.〉

e-mail: tetsu@subaru.naoj.org

渡 部 潤 一

〈国立天文台情報公開センター広報普及室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: jun.watanabe@nao.ac.jp

この10年間の観測で太陽系の果てには無数の小天体が存在することが明らかになった。検出された500個以上の小天体はエッジワース・カイパーベルト天体、あるいはTNO (Trans-Neptunian Object) と呼ばれている。そして、これらは太陽系の成り立ちを考える上で鍵になる微惑星の生き残りであると考えられている。期待通りこれまでで世界最高の観測効率を達成した我々のすばる望遠鏡と主焦点カメラによる広く深い太陽系外縁部探査を紹介する。

### 1. はじまり

渡部:「おーい、木下くんよ、どうだ見つかったか?」

2001年3月5日。大きな声で目が覚めた。もう日は昇っているようだった。ハワイでのすばる望遠鏡を使った観測を終えるやいなや帰国し、木曾観測所でのシュミット望遠鏡を用いた観測を行い、三鷹に戻ってきた。そして、ハワイでの観測で得られたデータの整約を行い、移動天体検出プログラムを実行した。しかし、すばる望遠鏡の主焦点カメラ2夜分のデータは膨大で、なかなか処理が終わらない。深夜のワークステーションでの作業中につい

間にか寝てしまったようだった。

木下:「もう処理は終わってるみたいです。」

移動天体検出プログラムの結果はプリンタに送られる。プリンタを見てみると、50枚以上の紙が溜っていた。見てみると、プログラムは実際の天体を拾ってるように見えた。

渡部:「実際の画像を見てみよう。」

木下:「あ! これじゃないですか?」

渡部:「お、そうだな。本物だ!」

プログラムの示す座標には25等級ほどの淡い天体があり、しかもその天体は黄道に沿って1時間あたり3秒角程度のスピードでゆっくりと、しかし確実に動いている。そう、我々は確かに太陽系の果てを見ていたのだった。

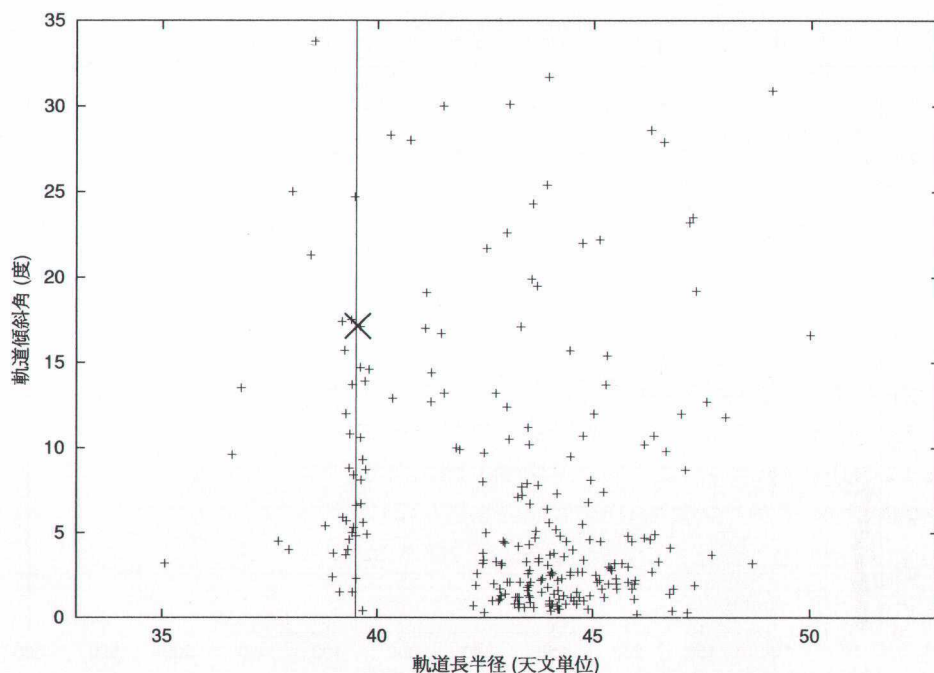


図1 異なる衝での観測のある35～50天文単位の軌道長半径を持つTNOの軌道分布を示した。縦軸には軌道長半径、横軸には軌道傾斜角をとった。大きなバツ印は冥王星を示す。また、39.5天文単位の縦の直線の付近に位置する天体は海王星と3：2の平均運動共鳴にある可能性がある。

## 2. 太陽系の果てを見たい

1930年の冥王星の発見以来、太陽系の果てに天体を探す努力はずっと続けられてきた。しかし、実際に海王星軌道の外側に冥王星とその衛星シャロン以外の天体が発見されたのは、CCDが観測に用いられるようになるのを待たなければならず、60年以上たった1992年の夏のことだった<sup>1)</sup>。その後の10年で、ハワイ大学のジュイットらのグループが検出した(15760) 1992 QB1に続いて太陽系の果てにぞくぞくと小天体が発見された。現在では海王星軌道の外側に500個以上の天体の存在が知られており、これらの天体はエッジワース・カイパーベルト天体、あるいはTrans-Neptunian Object（以後TNOと省略する）と呼ばれている。TNOは太陽から離れた場所に位置するので、太陽による加熱の影響をあまり受けていない。

したがって、太陽系形成初期の情報を比較的よく保存していると考えられている。そのため、これらTNOの空間的な分布、サイズ分布、また、反射能や密度、表層物質の組成など物理的特性を明らかにすることは、太陽系の起源と進化を考える上で重要である。

我々がすばる望遠鏡を用いた太陽系外縁部探査を行うにあたって、特に着目したのは次の2点である。一つはTNOの空間的な分布であり、もう一つはサイズ分布である。TNOはその軌道の特徴から3種類に分類される。共鳴天体、古典的天体、散乱天体である。図1と2にTNOの軌道分布を図示した。共鳴天体は海王星と平均運動共鳴にある天体であり、そのほとんどが海王星と3：2の平均運動共鳴にある。これらの天体は海王星が3回公転すると、きっかり2回だけ公転する。古典的天体は42～48天文単位の軌道長半径を持

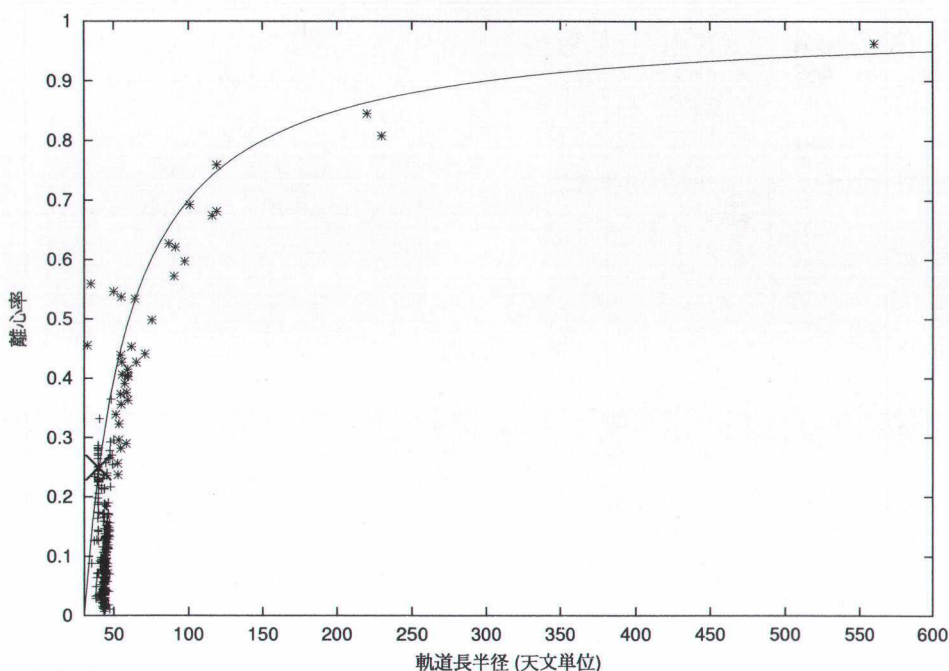


図2 異なる衝での観測のあるTNOの軌道長半径と離心率を示した。大きな軌道長半径を持つ散乱天体が見つかったが、それらは離心率も大きく例外なく近日点付近で発見されている。曲線は近日点距離30天文単位を示し、この曲線付近に位置する天体は、近日点において海王星軌道付近にまで内側に入り込んでくることを意味する。50天文単位よりも遠方に始源的な軌道を持つ天体はいまだに一つも見つかっていない。

ち、海王星とは共鳴関係にない。散乱天体は非常に大きな軌道長半径と離心率を持っている。これらの天体の近日点距離は海王星軌道付近であり、海王星の重力の影響で軌道を変えられてしまった天体であると考えられている。したがって、始源的な軌道を持つ遠方の天体はまだ見えていない。3:2の共鳴にあるTNOの軌道分布は、海王星がより内側から現在の場所に移動し、その過程で次々とTNOを捕らえたという理論でよく説明されている<sup>2)</sup>。一方、古典的天体の軌道分布については、離心率や軌道傾斜角が幅広く分布し、惑星からの摂動だけではその分布が説明できないことが明らかになっている。地球サイズの天体による散乱モデル<sup>3)</sup>、恒星の近接遭遇モデル<sup>4)</sup>、永年共鳴モデル<sup>5)</sup>など古典的天体の軌道分布を説明するいくつかの理論が提唱されている

ものの、いまだに決着がついていない。だが、これらのモデルはより遠方のTNOの軌道分布に対して、それぞれ異なった描像を描く。これまでまったく検出されていない50天文単位よりも遠方の離心率と軌道傾斜角の比較的小さな天体の軌道分布は、古典的天体の軌道分布を説明するいくつかの理論に対する厳しい試験となり、同時にTNOの最大サイズ、恒星の近接遭遇、原始太陽系星雲の散逸過程などについて貴重な情報をもたらしてくれる。つまり、遠くを見ることで、太陽系形成初期に何が起ったのかを知ることができるのである。また、サイズ分布には、過去の微惑星同士の衝突による成長・破壊の履歴が残されている。外惑星の形成速度や微惑星の衝突破壊強度を推定する上で重要である。

以上の観点から、すばる望遠鏡と主焦点カ

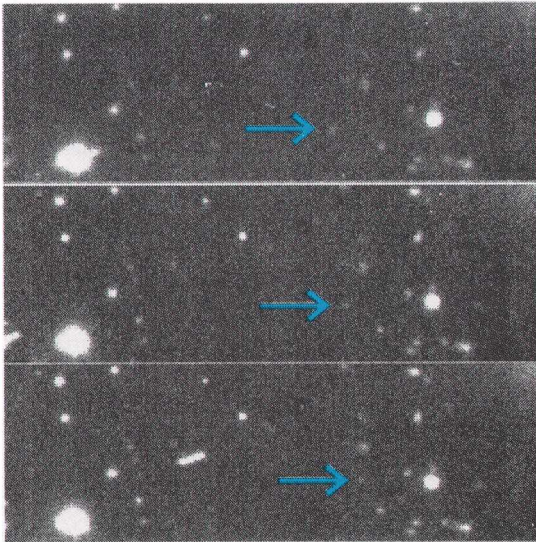


図3 2001 DS106 の検出画像。撮像した時刻は上から2001年2月25日 6:51:16, 7:47:41, 8:42:08 (UT)であり, Rバンドフィルターを用い, 積分時間はいずれも420秒である。矢印の先の天体がTNOである。見かけの明るさはRバンド等級で25.3等。1時間あたり3.1秒角のゆっくりとした速度で移動している。

メラによる太陽系外縁部探査を計画し, 2001年2月後半の新月期に2夜の観測を行った<sup>6)</sup>。TNOはその見かけの動きにより検出が可能であるが, 反太陽方向で見かけの動きが最大になる。そのため, 反太陽方向の黄道付近に7つの領域を選び, 前半夜は「広さ」を重視し5つの領域を観測し, 後半夜は「深さ」を重視し, 2つの領域を観測した。探査した領域は合計で1.39平方度であり, 黄緯は-1度から+1度までをカバーした。観測で得られたデータは我々グループが開発した移動天体検出プログラムMODE (Moving Object Detection Engine) により処理された。複数の画像から移動する天体を探す古典的な手法と, 日心距離を仮定したTNOの見かけの動きに合わせて画像をずらしながら足し合わせて検出する“Shift & Add”法の2つの異なる検出法を用いて, 合

計22個の天体を検出した。図3に実際に検出された天体2001 DS106を示す。

我々の研究グループは早くからすばる望遠鏡による太陽系外縁部の探査を計画していた<sup>7)</sup>。それは, 主焦点カメラを用いたすばる望遠鏡による観測は他の8メートル級の大型望遠鏡と比べて圧倒的に広い視野を得ることができるためである。空間分布やサイズ分布を把握するためには, 統計的に十分な数の天体を検出する必要がある。そのための集光力と視野の広さの両方を同時に満たすことのできる観測装置はすばる望遠鏡ただ一つなのである。表1にこれまでになされたRバンド等級で25等よりも深い探査についてまとめた。すばる望遠鏡の主焦点カメラの視野はおおざっぱに言って他の8メートル級の大型望遠鏡と可視光撮像カメラの15倍もある。逆に言うと, これまでに大型望遠鏡を用いて行われた太陽系外縁部の探査では非常に狭い領域しか見ておらず, また, 検出された天体の数もごくわずかである。8メートル級の大型望遠鏡を使ったにも関わらず新たな天体を一つも検出できなかった例もある。それに対して, すばる望遠鏡と主焦点カメラによる観測はこれまでで最高の観測効率を誇っている。

次に得られたデータに人工天体を埋め込み, 移動天体検出プログラムの検出効率の検証を行った。その結果を用いて, 黄道付近のTNOの面密度を求めた。得られた光度関数を図4に示す。観測された等級の範囲内では光度関数は単一の<sup>べき乗</sup>幕乗則でよくフィットされ, その傾きから推定されたサイズ分布

$$n(r)dr = \Gamma r^{-q} dr \quad (1)$$

の<sup>べき</sup>幕は $q = 4.25$ であった。ここで,  $n(r)dr$ はサイズが $r$ から $r+dr$ までのTNOの数であり,  $\Gamma$ と $q$ は定数である。この値は海王星よりも遠方の領域では質量の大部分がサイズの小さな天体により担われていることを示唆する。

表 1

| 観測装置               | 視野<br>(deg <sup>2</sup> ) | 掃天面積<br>(deg <sup>2</sup> ) | 限界等級<br>(mag) | 検出数 | 観測夜数 | 出典                     |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|-----|------|------------------------|
| HST/WFPC2          | 0.001                     | 0.001                       | 28.1          | 29? | 1    | Cochran et al., 1995   |
| Keck/LRIS          | 0.012                     | 0.009                       | 27.4          | 1   | 1    | Chiang & Brown, 1999   |
| VLT/FORS1          | 0.012                     | 0.012                       | 26.7          | 0   | 2    | Gladman et al., 2001   |
| Keck/LRIS          | 0.012                     | 0.028                       | 26.6          | 1   | 3    | Luu & Jewitt, 1998     |
| Keck/LRIS          | 0.012                     | 0.280                       | 26.2          | 5   | 6    | Luu & Jewitt, 1998     |
| Subaru/Suprime-Cam | 0.198                     | 1.386                       | 26.1          | 22  | 2    | Kinoshita et al., 2002 |
| CTIO/BTC           | 0.200                     | 0.770                       | 25.7          | 15  | 4    | Allen et al., 2001     |
| Palomar/2K-CCD     | 0.026                     | 0.049                       | 25.6          | 4   | 7    | Gladman et al., 1998   |
| CTIO/BTC           | 0.200                     | 0.510                       | 25.2          | 8   | 3    | Allen et al., 2001     |

これまでに行われた R バンドでの限界等級が 25 等よりも深い太陽系外縁部の探査をまとめた。すばる望遠鏡と主焦点カメラによる探査はその高い集光力と広い視野のため観測効率が非常によい。

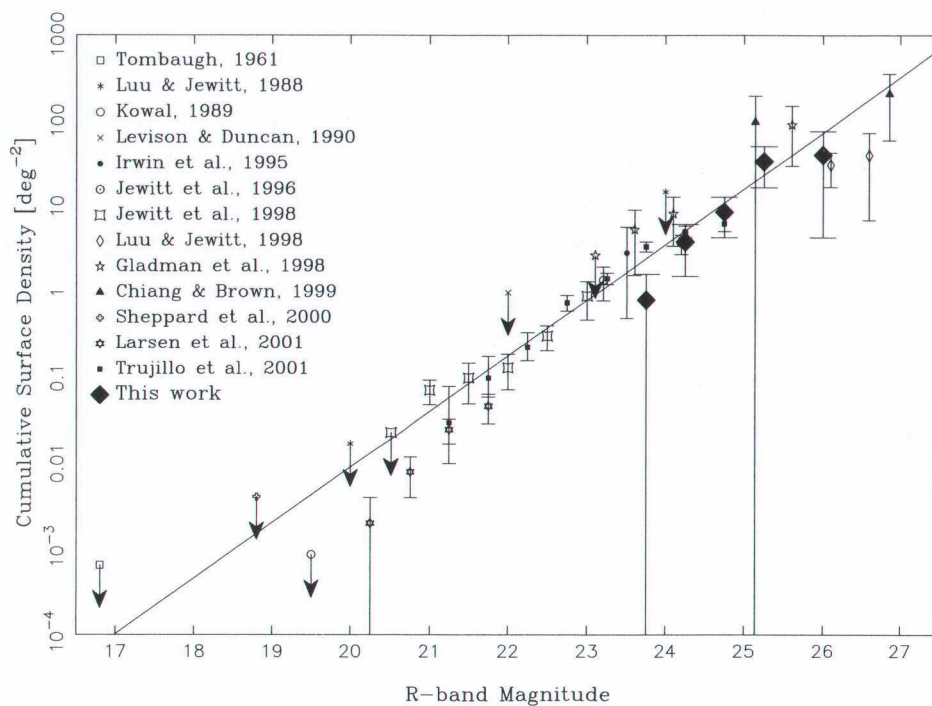


図 4 TNO の累積光度関数を示す。横軸は観測の限界等級、縦軸は 1 平方度あたりに存在する考えている限界等級よりも明るい TNO の数を示す。これまでの観測結果は単一の<sup>べき乗則</sup>でよく説明できる。

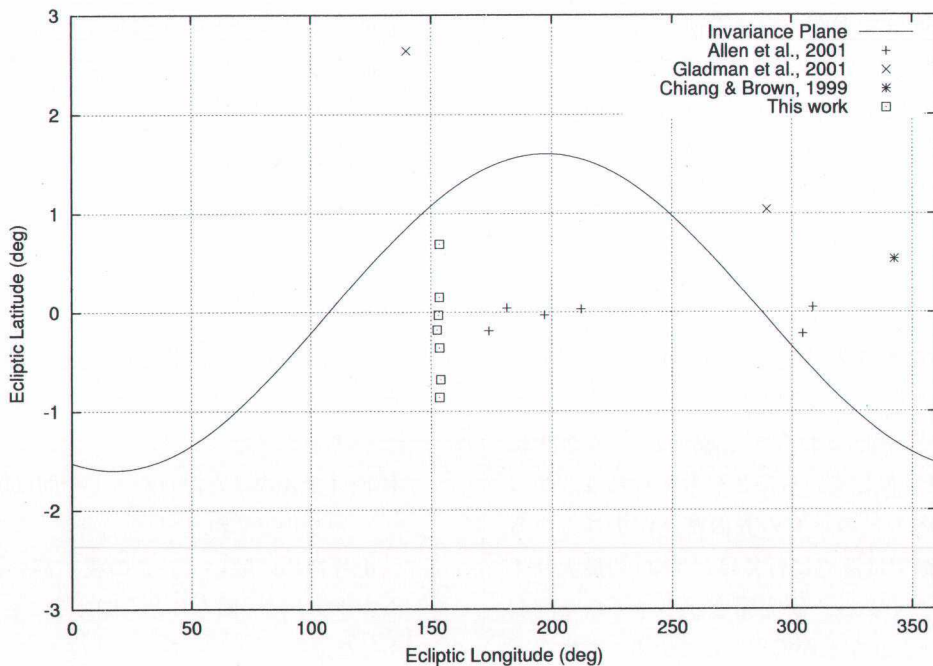


図5 これまでに深い太陽系外縁部探索の行われた天域を黄道座標系上で示す。個々の点は観測された領域の中心座標を示している。曲線は不変面であり、この付近は観測がほとんど行われていない。すばる望遠鏡と主焦点カメラは25等よりも深い探索において初めて移動方向に広い領域を観測した。

もう一つ注目していた50天文単位よりも遠方の天体については、残念ながら検出はなかった。彗星程度のアルベド4%を仮定すると、我々の探索は50天文単位において140 km サイズの天体を十分に検出できるものであった。また、検出はなかったわけだが、遠方の天体の面密度の上限値は押さえることが可能で、25.2等級よりも明るい50天文単位よりも遠方のTNOは1平方度あたり3.3個以下しか存在しないことが分かった。古典的天体の面密度は1平方度あたり21.8個であり、黄道付近において50天文単位を境に内側と外側では空間的な構造がまったく異なることが、黄緯-1度から+1度の広い領域に渡って明らかになった。では、なぜ50天文単位よりも遠方の天体の検出が一つもなかったのかを考えてみたい。もちろんいくつかの説明が成り立つわけだが、

ここではHahnの指摘する力学的に「冷たい」ディスクについて考えてみたい。これまでの深い探索がいずれも50天文単位よりも遠方の天体を検出できずにいるが、もしも50天文単位よりも遠方のTNOが非常に薄いディスク状に分布していれば矛盾はない。つまり、これまでの探索は黄道上の非常に狭い領域を観測しているため、薄いディスクを見損なっていたと考えるのである。しかし、今回の我々の観測は緯度方向に2度（-1度から+1度まで）もカバーしている。だが、我々の見ている黄道面は地球の軌道面であり、例えば、太陽系最大の惑星である木星の軌道面は黄道面に対して約1.3度傾いている。同様に不変面は黄道と約1.6度の角度をなしている。図5にこれまでの深い探索の行われた領域を示す。我々の探索以外は黄道面に集中しているか、黄道面

から比較的離れたところを観測している。不変面付近は探査が非常に手薄である。したがって、薄いディスクモデルを否定するのはまだ時期尚早である。また、もちろん、薄いディスク以外にも遠方のTNOが検出されていないことの説明は可能である。ベルト状の構造は本当に50天文単位でぎざぎざしているのかもしれない。太陽が星団のなかで生まれたとすれば無理なく説明できる。また、地球サイズの天体が他のTNOをかき乱していたり、過去に恒星の近接遭遇があったとすると、遠方では黄道付近に集中しておらず、厚いディスク状にTNOが分布していることも考えられる。他にも、もともとの星雲の表面密度が小さくなるため外側では遠方に行くほどTNOの最大サイズが小さくなる、衝突頻度が小さくなり内側のフレッシュな氷が露出しにくいので遠方の天体ほどアルベドが低い、などと言った説明が可

能である。いずれにしても、すばる望遠鏡と主焦点カメラは太陽系の果てを遠くへ遠くへと押しやることのできる現在利用可能な唯一の観測装置である。その観測結果がいかなるものであれ、太陽系の果ての新たな描像は太陽系の起源と進化を一步步明らかにしてくれることは確実である。

### 3. おわりに

すばる望遠鏡制御室にて、2002年5月初め、  
渡部：「おい、だから言っただろ。木下君は来ちゃダメだって。」

木下：「そんなこと言ったって今回は僕がPIじゃないですか。」

4月初めに続いて、この夜、高い湿度のためスリットは一瞬たりとも開けることができなかった。

太陽系の果てを探る試みはまだまだ続く・・・

### 参考文献

- 1) Jewitt D., Luu J., 1993, Nature 362, 730.
- 2) Malhotra R., 1995, AJ 110, 420.
- 3) Morbidelli A., Valsecchi G. B., 1997, Icarus 128, 464.
- 4) Ida S., Larwood J., Burkert A., 2000, ApJ 528, 351.
- 5) Nagasawa M., Ida S., 2000, AJ 120, 3311.
- 6) Kinoshita D., et al., 2002, AJ, submitted.
- 7) 渡部潤一, デーブ・ジュイット, 1993, 天文月報, 86(12), 504.

### Investigation of outer Solar System

**KINOSHITA Daisuke**

*Graduate University for Advanced Studies*

**YAMAMOTO Naotaka**

*Tokyo University of Science*

**FUSE Tetsuharu**

*National Astronomical Observatory of Japan*

**WATANABE Jun-ichi**

*National Astronomical Observatory of Japan*

Abstract: Last decade a large number of minor bodies has been detected in the outer Solar System. These objects are called Edgeworth-Kuiper belt object (EKBO) or trans-Neptunian object (TNO), and are thought to be remnants of planetesimals. We will report the results from our TNO search using Subaru telescope together with its prime focus camera.