

特集「太陽系天体の種別とその概念整理」 観測により太陽系外縁部を探る ——我々は真の姿に迫っているのか？

布施 哲治¹

(要旨) およそ70年間続いた「すいきん……てんかいめい」。この呪文が「……てんかい」に変わったのは、大型望遠鏡による観測により、太陽系外縁部の構造が明らかになってきたことによる。大規模なサーベイ観測は、当初の予想を超えた多様な姿も導き出した。太陽系外縁部天体の力学的分布、物理的特性、サイズ分布、さらに50天文単位(AU)に存在する空間分布の絶壁……。観測的手法により得られた知見の中から、本稿では太陽系外縁部の姿に焦点を当ててみたい。

1. 1950年から1998年まで

エッジワース[1,2]とカイパー [3]が予想した太陽系外縁部の姿——それに一歩近づいたのは、長い間サーベイ観測を続けていたハワイ大学のジュイットとルーが、1992年に最初の太陽系外縁部天体 (trans-Neptunian Object, TNO) 1992 QB1 を発見したときである[4]。その後は、より多くの観測者の参加、大型望遠鏡の利用、観測装置の進化などにより、TNO の発見数は増加の一途をたどる。

筆者は、日本天文学会の会報誌「天文月報」1998年5月号に、太陽系外縁部に関する当時の情報を記事『憧

れの“えくぼ”を追いまとめて』にまとめた[5]。「えくぼ」とは、EKBO を日本語的に読んだ愛称である。「将来はこれくらい広がっている天体が見つかるだろう」という予想のもと、約60個の TNO が知られているに過ぎなかったその頃に想像した太陽系外縁部の姿をその号の表紙に描いた(図1)。

最初の TNO の発見から15年が過ぎたいま、太陽系外縁部の姿は、観測によってどこまでその想像図に近づいたのか。



図1: 天文月報の表紙[5]。内側から木星、土星、天王星、海王星、冥王星の軌道で、細長い軌道はハレー彗星の軌道。一辺は約190AU。

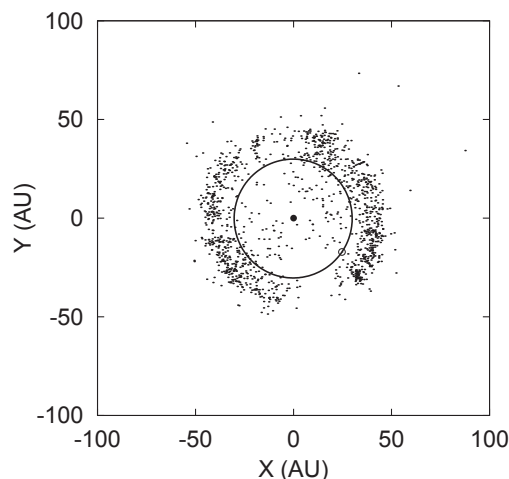


図2: 黄道面に投影した TNO と Centaur の空間分布 (2010年1月1日の位置)。●は太陽、円形は海王星の軌道、○は海王星の位置を示す

1. 国立天文台ハワイ観測所

2. 外縁部に関するこれまでの認識

本稿を執筆中の2007年12月26日現在、仮符号のついた TNO は 1,211個あり、そのうち確定番号が与えられたものは174個に上る[6]。一方、TNO が軌道進化し、木星と海王星の軌道間に遷移した Centaur の数は68個となった。現在の観測能力から、発見される TNO の直径は数十kmから数百kmが中心である。最大の TNO は準惑星となった Eris（直径約2,400km）で、冥王星（直径2,390km）が続く。

図2 は、2010年1月1日における発見された TNO と Centaur の位置を黄道面に投影したものである。1998年に想像した姿（図1）と比較すると、ベルトの幅が明らかに小さい。別の言い方をすれば、発見されている TNO の軌道は小さい。中には大きな軌道を持つ TNO も見られるが、それらは scattered TNO である。

次に、特に右下に TNO の少ない領域が見られる。力学的な現象かと思われるが、実は天の川がこの方向にあるため、サーベイ観測が積極的には行われておらず、結果的に発見数が少なくなっているのだ。いわゆる観測的バイアスである。

さらに面白い事実として、同じ経度方向に並んでいる TNO が見られる。実は、これも観測によるバイアスで、ある方向を観測すれば、視線方向に存在する天体が同時に発見されるためだ。

3. 観測結果の分布を力学的に見る

図2 の黄道面に投影した分布を眺めると、重要なポイントは TNO の広がりといえよう。その本質を知るには、軌道要素の分布を見るとよい。図3 には、発見された TNO について、軌道長半径と離心率の分布を60AUまで示した。上の数字はTNO が海王星と平均運動共鳴となる位置であり、例えば冥王星は2:3の共鳴領域に存在する。

観測数が少ない TNO は軌道決定の際に円軌道を仮定するため、離心率が0になっている。右上の方向に分布する天体が scattered TNO で、実際には図よりも大きな軌道長半径まで広がる。

一方で、軌道長半径が50AUよりも大きく、離心率の小さな天体はほとんど発見されていない。これが

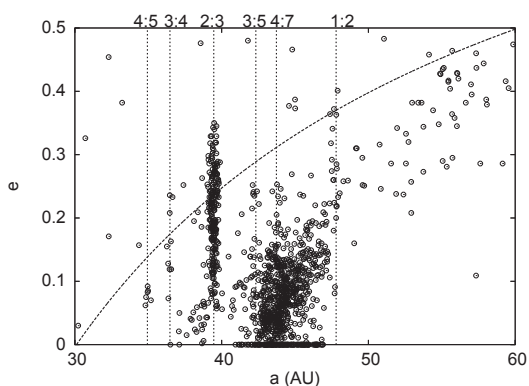


図3： TNO の軌道長半径と離心率の分布。曲線は、各軌道長半径において海王星軌道と交差する最小の離心率を示す。上の数字は海王星との平均運動共鳴の位置

先の空間分布で見たベルトの幅が小さい意味であり、50AU問題（英語圏では Kuiper Cliff）とも呼ばれる。ただし、2004年にはこの領域に2004 XR190が発見されたことは大きな注目に値する。

このような姿は、発見数が増えても大局的な構造として残るだろうか。図3は2007年12月までに発見された約1,200個の外縁天体における軌道長半径と離心率の分布であった。では、最初に発見された10個、同100個、同300個、同500個の軌道長半径と離心率の分布はいったいどのように見えるだろうか。図3に、外縁天体の発見史を適用してみたい。

4. 軌道分布から真の外縁部の姿

軌道要素の分布について、TNO と比較に都合のよい天体は小惑星といえよう。1801年に最初の Ceres が発見されてから、これまでに軌道が確定したもので約173,000個もある。

図4は、小惑星帯近傍の小惑星の軌道長半径と離心率の関係を示す。最初に発見された100個の小惑星の分布が図4-a、同1,000個の天体が図4-b と続く。この並びは、Ceres から現在までの発見の歴史、つまり発見に関する時間軸と見なせる。

図からわかることは、すでに5,000個が発見された段階（図4-c）で、現在の小惑星の分布（例えば数が少ないギャップや集合する群）は予想できてしまう点だ。確定番号5000の小惑星名は IAU (International Astronomical Union, 国際天文学連合のこと) で、

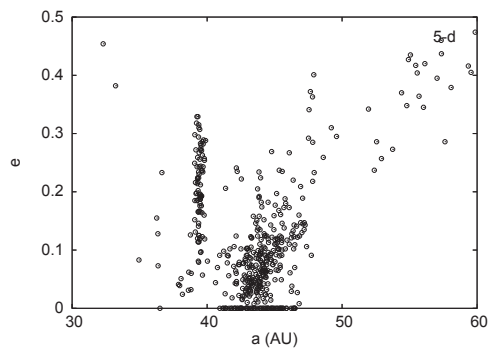
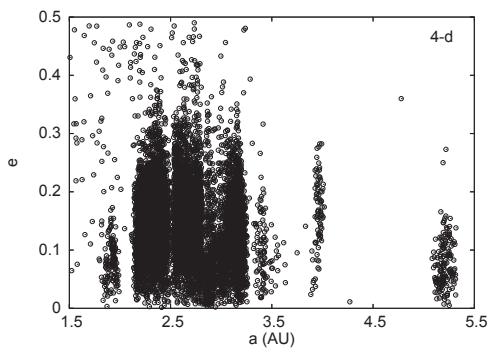
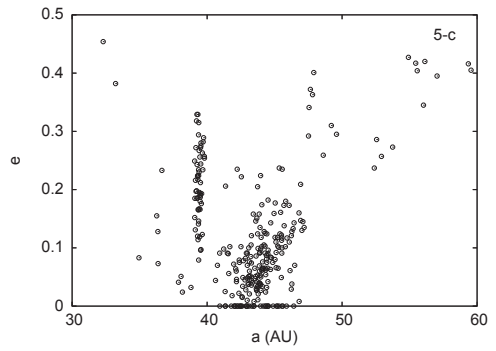
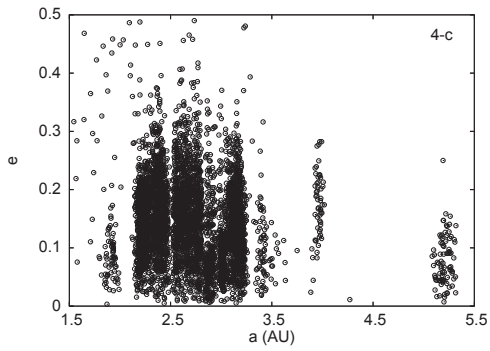
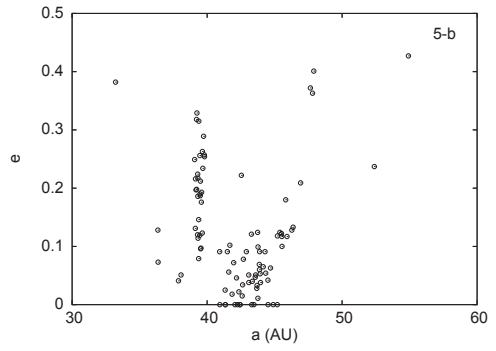
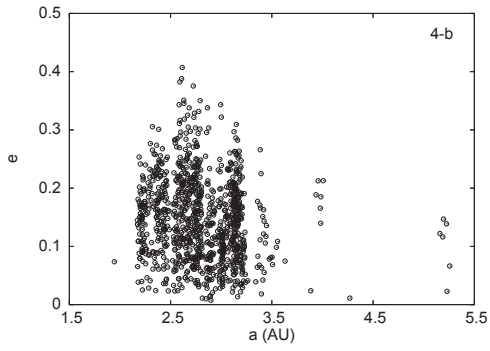
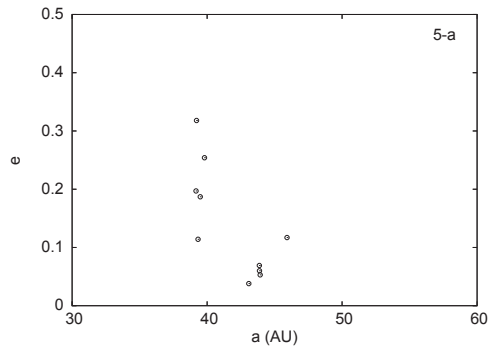
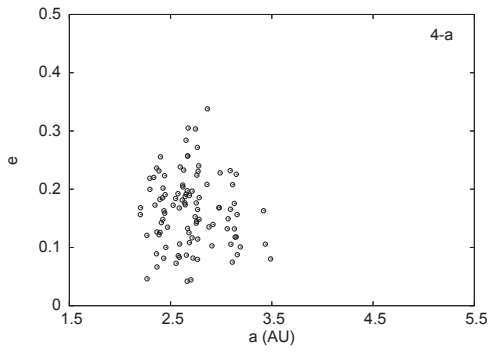


図4：小惑星の軌道長半径と離心率：(4-a) 最初の100天体，(4-b) 同1,000天体，(4-c) 同5,000天体，(4-d) 同10,000天体

図5：TNOの軌道長半径と離心率：(5-a) 最初の10天体，(5-b) 同100天体，(5-c) 同300天体，(5-d) 同500天体

1987年に発見された。つまり、すでに20年以上も前に、我々は現在とほぼ同じ小惑星帯の構造を見ていたのだ。

同様に TNO の軌道長半径と離心率の関係を図5-a から図5-d に示した。これらを眺めれば、300個が発見された2000年の段階（図5-c）で、現在の分布（図3）は明らかに見えている。

今後も発見数がふえたとしても、どうやら軌道要素の分布は大局的に変わることはなさそうである。我々は最終的な構造、太陽系外縁部の真の姿に到達している可能性が高い。

5. 望遠鏡の性能と現在の分布

先の議論について、我々の観測能力から検証したい。現在の主流は日本のすばる望遠鏡をはじめ、世界中におよそ10台以上が稼働する口径8mから10m の大型望遠鏡である。さらに、この先10年程度で、口径30mから100mもあるような超大型望遠鏡が動き出す。

観測装置の感度等にもよるが、前世代の口径4mクラス望遠鏡の限界等級は24等級程度であり、8mクラスの大型望遠鏡は26、27等級程度、30mクラスになると34等級にも達する。以上の限界等級を元に、離心率を0と仮定した各軌道長半径において検出可能なTNOの最小直径を図6に示した[7]。なお、ここでは外縁天体の表面の反射率は彗星核と同程度の4%を仮定している。

図6より、4mクラスの望遠鏡では、現在見つかった直径数百kmのTNOが50AU程度にあっても発見可能とわかる。さらに8mクラスの望遠鏡になれば、それらが100AUにあっても見つけられるのだ。ところが、図2から明らかなように、50AU以遠にベルト状の分布は見られない。発見できるはずなのに見つからない——これは、50AUよりも遠方にTNOは存在しないことを意味する。

一方、30mクラスの望遠鏡の実力があれば、50AUに存在する彗星核程度のTNOも検出可能だ。TNOは彗星の起源とする考えが一般的である。超大型望遠鏡の活躍により、予想通り「太陽系外縁部＝彗星の故郷」が成立することに期待したい。

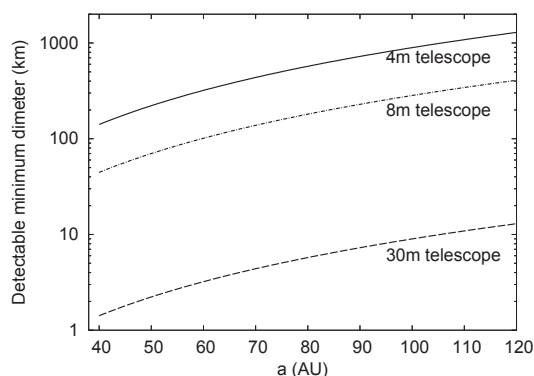


図6：望遠鏡の限界等級ごとに、各軌道長半径（離心率は0）において発見可能なTNOの最小直径。外縁天体表面の反射率は彗星核と同程度の4%を仮定した。

6. 科学データブックの改変

冥王星騒ぎにより子供から大人までが太陽系外縁部に目を向けたことで、社会に対し正しい情報発信がより一層重要になっている[8]。もちろん、日本が誇る『理科年表』では、平成20年版から「準惑星、太陽系小天体（TNOと小惑星）」の項目を新たに掲載した[9]。筆者が担当するこれらのページは、新しい事実が明らかになるに従い、今後も多くの修正を行っていく必要があるだろう。変更は、太陽系科学の進歩そのものといえることから、大いに歓迎したい。

参考文献

- [1] Edgeworth, K., 1943, JBAA 53, 181.
- [2] Edgeworth, K., 1949, MNRAS 109, 600.
- [3] Kuiper, G., 1951, astr. conf., 357.
- [4] Jewitt, D. and Luu, J., 1993, Nature 362, 730.
- [5] 布施哲治, 渡部潤一, 関口朋彦, 1998, 天文月報 91, 表紙.
- [6] IAU: Minor Planet Center (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/mpc.html>)
- [7] 渡部潤一, 布施哲治, 2004, 『太陽系の果てを探る』, 東京大学出版会.
- [8] 布施哲治, 2007, 『なぜ、めい王星はわく星じゃないの?』, くもん出版.
- [9] 国立天文台編, 2007, 『理科年表 平成20年版』, 丸善.