

特集「太陽系惑星の新定義」

冥王星の起源と太陽系外縁部の構造

1. 冥王星軌道と海王星軌道の関係

冥王星の軌道は、傾いていて歪んでいる（遠日点半径は近日点半径の1.7倍くらいもある）ということの他に、海王星の軌道周期のぴったり1.5倍の軌道周期を持つという特徴があります（軌道半径の比は、周期比1.5の2/3乗で1.3の比になります）。つまり、平均軌道半径が30.0天文単位（1天文単位は太陽と地球の距離）の海王星が3周公転する間に、平均軌道半径39.5天文単位の冥王星はぴったり2周公転します。このような状態を3:2の共鳴状態と呼びます。冥王星は軌道が歪んでいるため、時として海王星軌道の内側に入りますが、3:2の共鳴状態のため、海王星軌道の内側に入ってくる時には常に海王星は太陽をはさんだ反対側にいることになって、冥王星と海王星は軌道が交差しているにも関わらず決して近づきません。このことによって、冥王星軌道は安定に保たれているのです。

冥王星はなぜこんな特殊な軌道をしているのでしょうか？偶然でしょうか？特殊な軌道だったからこそ生き残っているのだという考え方もできるかもしれませんが、しかし、1992年のジェウィットとルウ（文献[1]）による発見以来、冥王星以外の海王星軌道以遠の小天体が続々と発見されました。海王星軌道以遠の小天体は、実際に発見されるよりずっと以前の19世紀頃から Trans-Neptunian Objects と呼ばれていました。以下では TNOs という略称を用いることにします。

驚くべきことに、発見されたTNOsの多くは、冥王

星と同様に軌道が歪んで、冥王星とほぼ同じ軌道周期をもっていて、海王星との3:2の共鳴状態に入っていたのです。これらの小天体群は "plutinos" と呼ばれています（文献[2]）。冥王星は孤立した天体ではなく、"plutinos" の代表選手だったわけです。

さらに驚くべきことは、冥王星軌道より遠くには多数の TNOs が発見されたのですが（これらは古典的カイパーベルト天体とよばれ、plutinos と合わせて"カイパーベルト天体"とよばれてきました）、冥王星軌道の内側にはごくわずかしか発見されていません。冥王星軌道の内側には軌道が（歪んでいなければ）安定である領域が広くひろがっているのです。

2. 海王星の移動と冥王星の軌道進化

冥王星や"plutinos"の軌道はどうして、海王星の3:2の共鳴位置（39.5AU）に集中し、歪んでいるものが多いのでしょうか？（軌道面が傾いていることについては詳細な議論がありますがここでは省略します；文献[3,4,5]などを参照）。

1993年にアメリカのレニュー・マハトラは、海王星が形成後に何らかの理由で外側に移動し、その移動の途中で冥王星を3:2の共鳴位置にはめこんで、そのままひきずっていったという大胆な説を発表しました（文献[6]）。

3:2の共鳴半径は海王星の平均軌道半径の1.3倍にあ

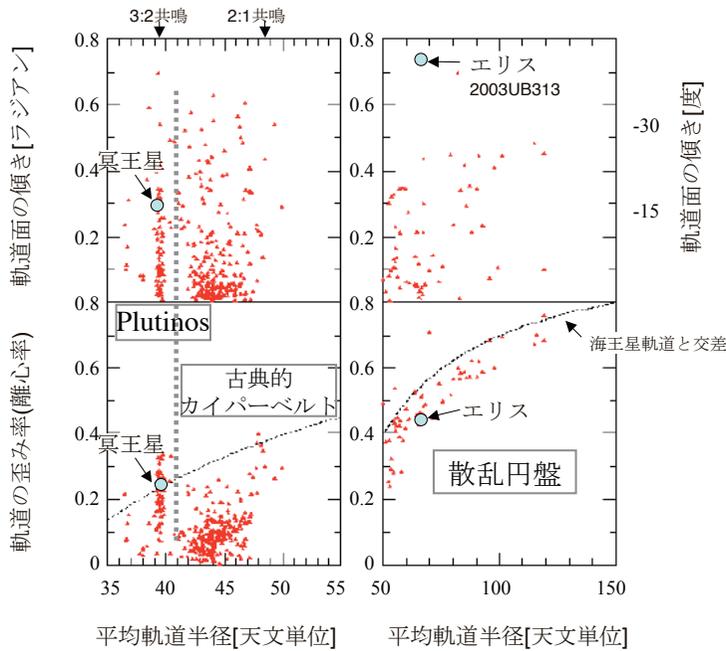


図1：TNOの軌道分布

るので、海王星の軌道半径の増加にともなって3:2の共鳴半径も増加します。3:2の共鳴では、毎回の会合で受ける海王星の重力の効果がいつも同じで打ち消し合わないので、累積の効果が強くなります。この効果によって、外側に移動する共鳴は出会った天体を次々と捕らえてひきずる一方で、その天体の軌道をどんどん歪めていくのです。歪みは、ひきずった距離に応じて大きくなります。"plutinos"で一番歪んだ軌道をつくり出すためには、海王星はもともと23天文単位くらいにあって、現在の30天文単位まで移動したと考えなければなりません。

海王星が23天文単位から30天文単位まで移動すると、3:2の共鳴半径は30天文単位から39.5天文単位まで移動することになり、もともとその領域にほぼ円軌道でまわっていた微惑星は最終的に39.5天文単位に掃き集められることとなります。はじめにどこにいたかで、ひきずられる距離が決まります。このことを使うと、冥王星はもともと32.5天文単位あたりにあって、そこではまだ他の微惑星も多数あり、冥王星はまだ形成途

上でしたが、海王星の3:2共鳴がやってきて、他の微惑星もろともひきずられていったのだと推定されます。

こう考えると海王星の3:2の共鳴位置(39.5AU)に多数の小天体が集中していること、それらの多くの軌道が歪んでいること、3:2の共鳴位置の内側にはほとんど小天体が発見されていないこと、といった観測事実が見事に説明されます。他の説で、これほど見事に観測事実と一致するものはないので、このマハトラによる海王星移動モデルは冥王星やplutinosの起源のモデルとして、いまでは疑う専門家は少なく、標準モデルとなっています。

このように、海王星が移動したことは間違いないと思われていますが、そもそも、なぜ海王星が移動したかのメカニズムについては、まだ決着はついていません。もっとも支持を集めている説は、フェルナンデスとイブによって1984年に提案された、残存微惑星散乱を通しての木星、土星、天王星、海王星の角運動量交換です(文献[7])。木星、土星、天王星、海王星がほ

ば形成されたあとに残存している微惑星を、例えば海王星が重力で木星のほうへとばして、次は木星が散乱して天王星のほうへというようなことを繰り返すと角運動量がこれらの4惑星の間で次々と交換されます。それは結局、4惑星の軌道を拡散させます。しかし、木星や土星は天王星、海王星よりずっと重く、あまり動かないので、もっぱら天王星、海王星軌道が外に広がることとなります。

実は3:2共鳴と同様に強い共鳴である2:1共鳴(47.7天文単位)にはほとんど小天体は捕まっています。このことは海王星がどのように動いたのか、なぜ動いたのかを考える上で重要な制約になります(文献[8,9])。

また、カイパーベルト天体の総量の観測データからの推定値は、太陽系の水星から海王星までの材料固体物質の外挿値の1/100ほどしかありません。このことも、海王星や冥王星、カイパーベルト天体の形成を考える上で重要な制約になります(たとえば文献[10])。

3. 散乱円盤と彗星の起源

海王星がもともと23天文単位にあったとすると、3:2の共鳴半径は30天文単位になりますが、共鳴の初期位置より内側にあった微惑星はどうなったのでしょうか?これらは海王星に近付いて強く散乱され、plutinos などよりはるかに軌道が大きく歪んだと考えられます。さらに、海王星に近接散乱されたのだからいずれ海王星軌道まで戻ってきます。そしてまた散乱されるということを続けます。このような天体群は散乱円盤天体(scattered disk objects)と呼ばれています(文献[11])。冥王星より大きく、第十惑星ともいわれた2003UB313(文献[12])は散乱円盤天体に属します。

散乱円盤天体は、他の天体(通過する別の恒星や銀河系の腕など)の影響を受けて軌道が変わると、もは

や海王星軌道までは戻ってこなくなると太陽系外縁部をさまようオールト雲の彗星になってしまったり、海王星軌道のずっと内側まで入りこむようになって比較的短周期の木星族彗星になるのではないかと考えられています(たとえば文献[13])。オールト雲の彗星は再び、他の天体の影響を受けて再度軌道が変わって海王星軌道のずっと内側まで入りこむようになると、長周期彗星として観測されます。

このように、太陽系外縁部の海王星、TNOs(冥王星、カイパーベルト天体、散乱円盤天体)や彗星は、お互いに深く結び付き、その軌道分布は、かつて考えられていた以上にダイナミックであった太陽系の形成プロセスを映し出しているのです。

参考文献

- [1] Jewitt, D. and Luu, J., 1993, Nature 362, 730.
- [2] Jewitt, D. and Luu, J., 1996, ASPC 107, 255.
- [3] Ida, S. et al., 2000, Astrophys. J. 528, 351.
- [4] Nagasawa, M. and Ida, S., 2000, Astron. J. 120, 331.
- [5] Kobayashi, H. and Ida, S., 2001, Icarus 153, 416.
- [6] Malhotra, R., 1993, Nature 365, 819.
- [7] Fernandez, J. A. and Ip, W.-H., 1984, Icarus 58, 109.
- [8] Ida, S. et al., Astrophys. J. 534, 428.
- [9] Hahn, J. M. and Malhotra, R., 2005, Astron. J. 130, 2392.
- [10] Levison, H. F. and Morbidelli, A., 2003, Nature 426, 419.
- [11] Duncan, M. J. and Levison, H. F., 1997, Science 276, 1670.
- [12] Brown, M. E. et al., 2005, Astrophys. J. 635, 97.
- [13] Morbidelli, A., 2005, astro-ph/0512256.

本稿は主に井田茂氏が執筆を担当しました。