# カイパーベルト天体の軌道共鳴

# The Orbital Resonance of Kuiper-Belt Objects

作花 一志 (京都情報大学院大学)

Kazushi Sakka (The Kyoto College of Graduate Studies for Informatics)

#### **Abstract**

About 1300 Kuiper Belt Objects are investigated statistically. From the relation of their semimajor axis and eccentricity, 180 objects are chosen as Plutino, and 160 objects as Cubiano.

## 1. はじめに

冥王星は 2006 年に惑星から外れたがその分類については 30 年もの論争があったことは専門家以外にはほとんど知られていない。1930 年に発見された直後から他の 8 惑星に比べて,軌道面が大きく傾いていること,軌道離心率が大きく扁平な楕円を描き,海王星軌道の内側に入り込むことが指摘されていた。1977 年冥王星に衛星カロンが見つかったが,驚いたことに,カロンの公転周期,カロンに自転周期,冥王星の自転周期がともに 6.4 日であることだ。これでは冥王星とカロンは見えない棒でつながれているようなものである。さらにこの周期からケプラーの第 3 法則を使って冥王星の質量を求めると地球の 1/400 しかない。なんと冥王星は月よりも小さい,これでも「惑星」といえるか?しかしこれだけでは惑星から外す決定的な根拠にはならなかった。

1990年代になってから観測技術は飛躍的に発展し暗い遠い天体の画像が得られるようになり、太陽系外縁に多数の小惑星(カイパーベルト天体:KBOと略す)が発見された。2000年前後には冥王星のサイズに迫るKBOも見つかって、除外はもはや時間の問題かと言われた。そしてついに2005年にエリスが発見され、そのサイズ質量とも冥王星と同等であることがわかった。翌年の国際天文連合で惑星の再定義が行われ、冥王星は惑星ではなく準惑星に分類された。その後多数のKBOが発見され、現在KBOの中にはいくつかのグループがあることがわかってきた[1]。

この小文の以下の節では KBO の軌道要素データ

を統計的に調べたところ多数の軌道共鳴現象が見い だされたことを述べる。

## 2. KBO のデータ

KBO のデータは国際天文連合小惑星センターのサイトより採った。KBO のうちの Distant object と呼ばれているものに限った [2]。

データ件数 1362, データ項目は軌道要素のほかに確定番号, 固有名, 絶対等級, 発見日, 登録文献などなど多数あるが, 処理に必要なものに限り, Hでソートしたベスト 10 を表 1 に載せた。

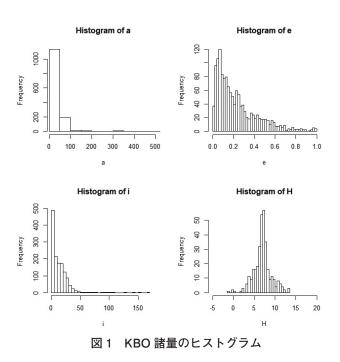
Hとは絶対等級といわれる物理量で、太陽からも地球からも1au (天文単位:太陽地球間の平均距離で1.486億km)としたときの明るさ(等級)である。最も明るいのはエリスで次がプルート (冥王星)である。KBO は自ら光っているわけではなく太陽の光を反射しているのだから、明るいということは

- ・表面積が大きい、すなわちサイズが大きい
- ・表面の物質は氷粒のように反射しやすいということを表している。通常 H はサイズの指標とみなされている。a は太陽からの平均距離(単位はau)であるが、500 以上のものが 5 個、そのうち 2 個は 1000 以上であった。100 以下のものが圧倒的で 1331 個である。e は楕円軌道の離心率 0 以上 1 未満の数であり、100 は真円で、数値が大きいほど扁平な楕円となる。また 100 は東田で、数値が大きいほど扁平な楕円となる。また 100 は軌道傾斜角、天体の軌道面と地球の軌道面の交角であり、100 度以上なら公転は逆回りとなる。そのようなものは 110 個見つかった。100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100

和は楕円の長軸の方向を表す。他の諸量は今回の考察とは無関係なので省略する。KBO の質量は衛星を持っている場合には求まるが、サイズや反射能などは赤外線観測などの結果がないとわからない。

# 3. 軌道要素の統計的考察

図 1 は a, e, i, H のヒストグラムであるが a において 500 以上の 5 個は除外した。H は左右対称に近いが他 3 つは左寄りである。



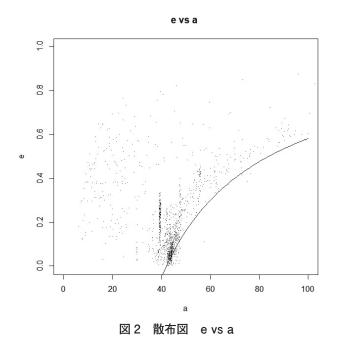
散布図としては6個 (a-e a-i a-H e-i e-H i-H) 描かれるが興味ある図は a-e のみである。 a<100の KBO1331 個について散布図を描くと図 2 のような特徴ある分布が得られた。

- 1) a の値に関わらず e>0.5 の領域には点が少ない。
- 2) 右下には全く点がない。
- 3)  $a \sim 40$  あたりに集中してしかも  $a \sim 39$  (ここに 冥王星も含まれる) と  $a \sim 43$  あたりが特に際立っている。
- 1)は扁平な楕円を描く KBO は少ないということを意味しヒストグラムの結果と一致する。2)は $\lceil$ e が小さく a が大きい,すなわち円に近い軌道で太陽から遠くを回っているような KBO は存在しない」のではない。a が大きい KBO が見つかるのは近日点距離 q=a(1-e) がある値以下の場合である。そうでない場合では KBO は見つけにくいということを意味しているのであって,存在しないとは言え

ない。点群の下限をなぞると曲線 y=1-q/x が描かれるが、これより適する近日点距離は q=42 である。

## 4. 軌道共鳴

最後に3)について考察する。ケプラーの第3法則によって公転周期をp(単位は年)とすると $a^3=p^2$ であり、さらに海王星の公転周期164.79年との比を取り、aの代わりにこのpを使って図2を書き直してみたのが図3である。すると $p\sim1.5$ あたりと $p\sim1.8$ あたりに集中が見られる。第1の集中は公転周期が海王星の1.5倍のKBOである。実は冥王星の公転周期は海王星のそれの1.5倍である



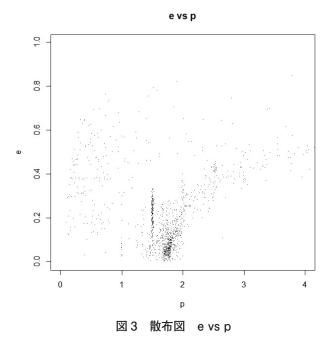


表 1 明るいカイパーベルト天体 ベスト 10

Name	a	е	i	Н	ω	Ω	$M_0$	epoch
Eris *	67.69022	0.442065	44.1421	-1.2	151.1942	35.90668	204.5206	20151217
Pluto *	39.52808	0.250996	17.15612	-0.4	113.5021	110.2899	38.15936	20150903
Makemake *	45.75715	0.154314	28.99902	-0.3	296.8693	79.45707	158.0788	20151221
Haumea *	43.30661	0.189481	28.19507	0.1	239.6448	121.8373	211.0836	20151124
Sedna	507.3846	0.850123	11.92873	1.6	311.4541	144.5477	358.0949	20151210
Orcus	39.46951	0.217991	20.56402	2.2	72.97814	268.5706	174.6712	20160110
Quaoar	43.37423	0.034699	7.98702	2.4	155.2047	188.7727	287.5823	20150906
2007 OR10	66.92535	0.506825	30.94389	2.5	206.8142	336.8139	104.1263	20150920
2002 TX300	43.11358	0.121707	25.87837	3.4	338.9434	324.6984	73.77976	20151205
Varda	45.79965	0.139877	21.49483	3.4	182.9563	183.9437	266.9483	20150512

#### \*準惑星

ことは以前から知られていた。すなわち海王星が3 公転する間に冥王星はちょうど2公転する[1]。

このような天体は冥王星だけでなく付近に多数あ るということだ。p が 1.475~1.525 の KBO は 182 個、その中には冥王星の他にもオルクス、イクシオ ンなど比較的大型のものもあり、プルティーノ族と 呼ばれる[3]。冥王星の衛星であるカロンも含まれ る。

第2の集中は公転周期が海王星の1.75 (=7/4) 倍の KBO である。p が 1.725~1.775の KBO は 157 個. その中にはマケマケ. ハウメア. 1992QB1 など比較的大型のものも含みキュビワノ族と呼ばれ る[4]。

では公転周期が海王星の8/4倍の天体は?ある. トゥーティノ族と呼ばれ47個確認される。なお公 転周期が海王星と同じものが 16 個ありこの図で辛 うじて認められる。

冥王星は惑星から外れ準惑星に分類されたという より、プルティーノ族を率いていると言ってもいい だろう。この族のメンバーで軌道要素が冥王星に近 い天体を 2 個(1998 HQ151, 2004 HY78)選んで その軌道を描いた(図4)。軌道が交差しているよ うに見えるが、軌道傾斜角が異なるので衝突は起こ らないようだ。なお準惑星のうち冥王星、マケマケ、 ハウメアは族のメンバーになったが、エリスはどこ の族にも属していない。さて 1362 個の KBO のう ち最もよく似た軌道を持つペアを探そう。そのため にはクラスター分析を行う。a, e, i, som(=  $\Omega + \omega$ ) 4次元空間での KBO 間距離を計算し、13622個の 数値からなる行列を作り、その最小値を探せばよい。

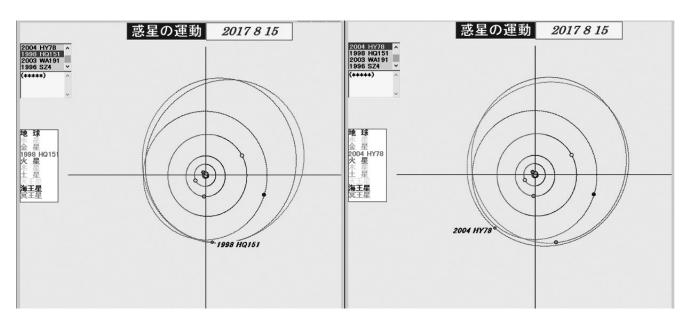


図4 冥王星とよく似た軌道を描く2つのKBO。最外の楕円が冥王星と件のKBOである。

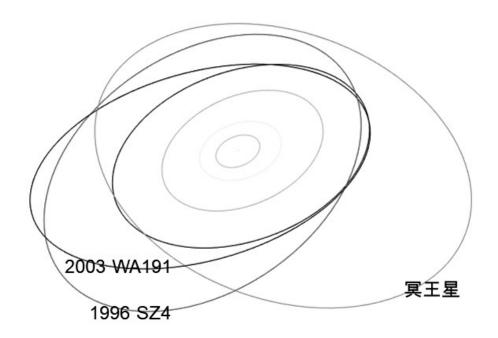


図 5 木星以遠の惑星と冥王星, 2003 WA191, 1996 SZ4 の軌道。惑星はほぼ円軌道で軌道傾斜がほとんどゼロである。 冥王星は傾きが最も大きい。3 つともプルティーノ族である。

その値は行列の [597,20] 要素であり、小惑星のペアは 597 番目 2003 WA191 と 20 番目 1996 SZ4 であることがわかった。木星から海王星までの惑星、冥王星、この 2 つの KBO の軌道を図 5 に載せた。

このように公転周期が簡単な比をなす現象は軌道 共鳴と言われ太陽系天体では珍しいことではない。 最も有名なのは木星の衛星イオ,エウロパ,ガニメ デの公転周期の比が1:2:4となることであり, 土星の衛星間にもみられる。

また太陽・木星と正三角形をなして木星と同周期で公転しているトロヤ群と呼ばれる約 2000 個の小惑星もある。地球近傍で公転周期が1年という小惑星も発見されている[5]。小天体は大惑星の重力の影響で離散集合を受けやすく、その安定性は古くからいろいろ論じられているがこの小文では言及しない。

本研究は「国際化を考慮した社会的ネットワーキング指向の次世代eラーニング基盤の開発(日本学術振興会科学研究費課題番号16H03087,研究者代表・岡本敏雄氏)」の研究補助金のサポートの下で行われている。

#### 【参考文献】

- [1] https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%A5%E7%8E% 8B%E6%98%9F
- [2] http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/ Distant.txt
- [3] https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%86%A5%E7%8E% 8B%E6%98%9F%E6%97%8F
- [4] https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AD%E3%83% A5%E3%83%93%E3%83%AF%E3%83%8E%E6%97% 8F
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/2010\_TK7

### ◆著者紹介

#### 作花 一志 Kazushi Sakka

京都情報大学院大学教授。 京都大学大学院理学研究科宇宙物理学専攻修了, 京都大学理学博士 専門分野は古天文学,統計学。 元京都大学理学部・総合人間学部講師, 元京都コンピュータ学院鴨川校校長, 元天文教育普及研究会編集委員長