

# 星の王子さまの来た道

——小惑星軌道の大きな変化——

吉川 真\*

……ぼくは、およそ人の住んでいるところから、千マイルもはなれた砂地で眠りました。難船したあげく、いかだに乗って、大洋のまん中をただよっている人より、もっともひとりぼっちでした。すると、どうでしょう、おどろいたことに、夜があけると、へんな、小さな声がするので、ぼくは目をさしました。声は、こうっていました。

「ね……ヒツジの絵をかいて！」

「え？」

「ヒツジの絵をかいて……」

ぼくは、びっくりぎょうてんして、とびあがりました。なん度も目をこすりました。あたりを見まわしました。すると、とてもようすのかわったぼっちゃんが、まじめくさって、ぼくをじろじろ見ているのです……

(“星の王子さま”より)



小惑星、B-612 番の王子さま

## 1. はじめに

サン=テグジュペリの有名な童話“星の王子さま”では、B-612 という小惑星から地球にやってきた王子さまが、サハラ砂漠に不時着した飛行士 (=筆者) に出会うところから話が始まる。飛行士は、しだいに、王子さまが地球に来ることになった理由や旅の途中で体験したこと、さらに王子さまが友だちのキツネからもらった“秘密”を知ることになる。そして、地球に来てからちょうど一年後、王子さまは故郷に残してきた「花」のもとへと死を決意して帰っていくのである。ところで、王子さまは、遙か遠くの小惑星から地球までロケットなどは使わずに来たわけであるが、実際に火星と木星の間にひろがる小惑星帯から地球にまでたどりつく“道”はあるのだろうか。ここでは、“星の王子さま”の詩的な世界に比べれば野暮な話であるが、小惑星帯から地球まで小惑星がやって来ることがありうるかという問題について、天体力学の立場から考えてみることにする。

### 小惑星の分布

まず、小惑星の分布のようすを概観しておこう。1801年1月1日の夜(19世紀最初の夜)に小惑星の第一号セレスが発見されてから現在(1989年8月)までに、4100個以上の小惑星の軌道が決定されている。その空間分布をみると図1のようになる。図1では1番から4000番までの小惑星の1989年10月1日現在の位置が示してあ

る。この日に、高性能のロケットに乗って太陽系を上からや横から眺めることができれば、図1のように見えるはずである。もっとも、図では小惑星や惑星の大きさは誇張して描いてあるため、実際はこれほどはっきりとは見えないであろう。ちなみに、最大の小惑星セレスでも直径が1000 km程度であり、その他はこれよりもずっと小さい。図1より、大部分の小惑星は火星と木星の軌道の間に厚さ2 AU (AU=天文単位; 1 AU=1億5千万 km) ぐらいのドーナツ状に分布していることがわかる。ただし、火星軌道の内側にも小惑星は存在するし、また木星軌道付近にも木星の前後にいくつかの小惑星がある。この木星の軌道付近に存在している小惑星はトロヤ群と呼ばれ、公転周期は木星と等しいため常に木星の前方と後方にある。

小惑星の分布のようすをもう少し詳しくみてみよう。そのためには、軌道要素というものを用いなければならない。小惑星の運動は第一近似として太陽を一つの焦点とする楕円軌道と考えるとよいが、この楕円の大きさ、形、向き、そして小惑星の位置を示すために軌道要素が用いられる。ここでは、軌道要素6つのうち3つをおもに用いるが、それらは、軌道長半径( $a$ )、離心率( $e$ )、軌道傾斜角( $i$ )である。軌道長半径とは楕円の長軸の半

\* 東大理

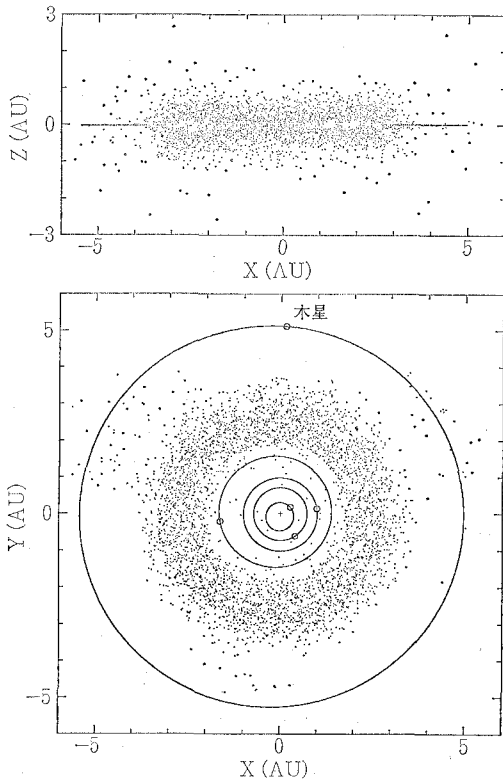


図 1 1989 年 10 月 1 日の小惑星の分布. 惑星の軌道面 (X-Y) およびそれに垂直な面 (X-Z) に小惑星の位置を投影したもの. 比較のために惑星の軌道とその位置も示してある.

分の長さであり, 軌道の大きさを示すものである. 離心率とは楕円の偏平度を表わす数値であり, 円軌道は  $e=0$  で  $e$  が 1 に近づくにつれてつぶれた楕円になる. また, 近日点距離や遠日点距離は  $a(1-e)$ ,  $a(1+e)$  であるため,  $e$  が 1 に近づくとき近日点は太陽に近づき遠日点は太陽から遠ざかる. 軌道傾斜角とは, 基準の面 (たとえば地球の軌道面) に対する軌道の傾きを示す.

小惑星の軌道長半径の分布は, 地球 ( $a=1$  AU) より小さいものから, ヒダルゴ ( $a=5.8$  AU) やキロン ( $a=13.7$  AU) のように木星 ( $a=5.2$  AU) や土星 ( $a=9.6$  AU) の外側にまでわたっている. 図 2 に木星軌道までの小惑星の分布を示す. 大部分の小惑星は主小惑星帯と呼ばれる領域 ( $2.1 < a < 3.3$ ) に集中している. この主小惑星帯における  $a$  分布は一概ではなく, 木星と小惑星との公転周期が簡単な整数比 ( $3:1$ ,  $5:2$ ,  $7:3$ ,  $2:1$ ) になるところ, つまり公転周期における共鳴 (レゾナンス) が起こるところには小惑星がほとんど存在していない. この特徴はカークウッドによって 1867 年に発見され, カークウッドギャップと呼ばれている. あとで, このギャップに注目することになる. ところが, 主小惑星帯の外側では, 逆に木星と公転周期におけるレゾナンスにあるところには数は少ないが小惑星が集中して存在している. この集中はヒルダ群 ( $3:2$ ), チューレ群 ( $4:3$ ), トロヤ群 ( $1:1$ ) と呼ばれている.

小惑星の離心率は  $e=0.0$  から  $e=0.9$  まで広い範囲に分布しているが, 大部分は  $0.0 < e < 0.3$  の間にある

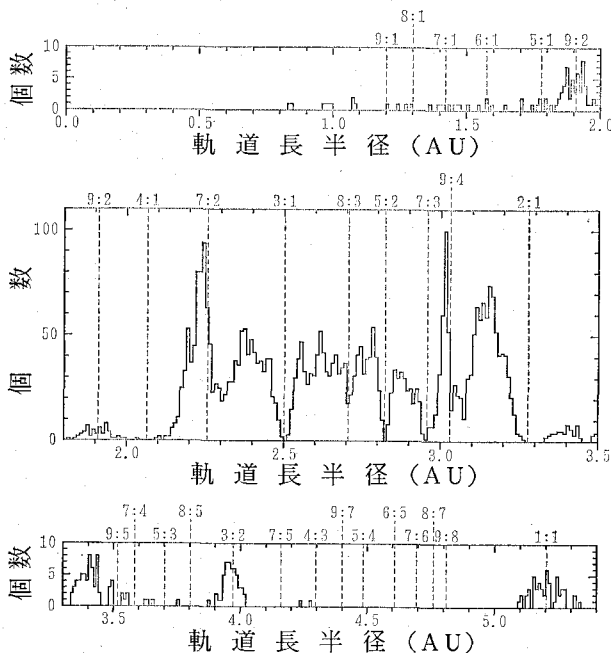


図 2 小惑星の軌道長半径の分布 ( $\Delta a=0.01$  AU). ヒダルゴ ( $a=5.8$ ) とキロン ( $a=13.7$ ) を除く 4000 番までの小惑星の分布を示す. 破線は木星と公転周期におけるレゾナンスが起こる位置であり, 数字は木星と小惑星との公転周期の比を示す.

(分布のピークは  $0.1 \sim 0.2$ )。特に、 $a$  が小さいところ ( $a < 2.0$ ) では  $e$  の大きいところまで分布しているが、 $a$  が大きくなると  $e$  が小さいものしか存在しなくなる傾向がある。これは、木星とレゾナンス関係にない大部分の小惑星においては、その遠日点は木星軌道にはあまり近づかないということの意味している。つまり、現在軌道が確定されている小惑星は、軌道が大きく変化しない限り、木星に非常に接近することはないのである。

小惑星の軌道傾斜角の分布の範囲も広く、 $0^\circ$  から  $65^\circ$  にまで及ぶが、大部分は  $0^\circ$  から  $30^\circ$  の間に分布している (分布のピークは  $5^\circ \sim 10^\circ$ )。  $e$  分布の場合と同様に、 $i$  分布においても  $a$  が小さい方で  $i$  が大きいところまで分布する傾向が見られる。ただし、トロヤ群に関しては  $i$  が大きいところ ( $i \sim 40^\circ$ ) まで分布している。図3に  $a-i$  平面上に小惑星をプロットしたものを示す。この図には小惑星の分布のいくつかの特徴をまとめてみることができる。第1に縦方向に分布のしな模様が見られるが、これは図2ですでに示されていたギャップや群の特徴である。第2には、実線で示した付近には小惑星が少ないということがあげられる。この領域では永年共鳴  $\nu_6$  と呼ばれる特殊な現象が起こっている。この現象にもあとで注目することになる。第3に、図3で数カ所 (たとえば、 $a=2.8, i=2.5$  や  $a=3.0, i=10$  や  $a=3.2, i=2$  など) に小惑星が密に分布している所が見られるが、これは平山清次によって1918年に発見された“族”と呼ばれる集団である (古在, 1979)。同じ族に属する小惑星は似た  $a, e, i$  の値を持っており、その起源は興味深い問題となっている。

### 小惑星の運動

小惑星系というものは、惑星が支配する重力系の中で様々な初期値を持つ粒子 (テストパーティクル) を放ったものと考えることができ、いわば“天体力学の実験

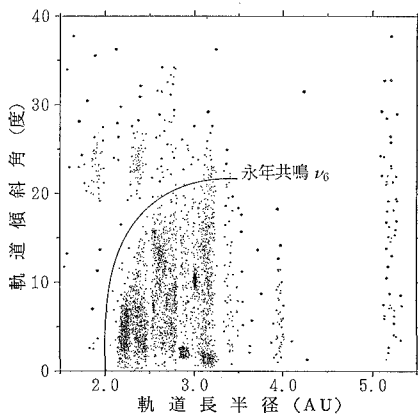


図3 小惑星の軌道長半径と軌道傾斜角の分布。実線は永年共鳴  $\nu_6$  の位置を示す。

室”と見なすことができる。小惑星の運動に関しては現在までに非常に多くの研究があり、軌道や初期条件によって小惑星は様々な運動をすることがわかってきた。ここでは、公転周期における共鳴にある場合と永年共鳴  $\nu_6$  にある場合について最近得られた結果をまとめてみることにする。ただし、現在発見されているほとんどの小惑星はこのような共鳴状態にはない。共鳴状態にない大部分の小惑星の軌道の変化は小さく、百万年のタイムスケールで見ると、 $a$  は短周期の小さい変動を除けば一定であり、 $e$  の変化量は  $0.1$  程度、 $i$  の変化量は  $2^\circ \sim 3^\circ$  程度である。ところが、上に述べた共鳴状態にあると、軌道の変化の仕方は全く異なるのである。逆に言えば、一般の小惑星の  $a, e, i$  の変化は小さいので、“小惑星の  $a, e, i$  が広い範囲に分布しているのはなぜか”ということが大きな問題となる。この問題を解くためには小惑星の軌道変化を調べることに加えて、太陽系形成のメカニズムや太陽系の進化を調べる必要がある。

小惑星の運動を調べる方法には、解析的方法、半解析的方法、数値的方法などがあるが、ここでは具体的な方法については省略する。ただし、以下で述べる結果はおもに太陽—木星—土星—小惑星 (小惑星の質量は無視してある) という系に関して約百万年のタイムスケールで得られたものである。

## 2. 木星と公転周期が簡単な整数比にある小惑星の運動

木星と公転周期におけるレゾナンスにある場合の小惑星の運動はまだ十分に理解されているわけではないが、図2でみたようにレゾナンスが起こるところには小惑星の分布におけるギャップや群が見られるのでレゾナンスというものが小惑星の運動に大きな影響を与えていることは確かである。ここでは特にカークウッドギャップに注目することにする。今から百年以上も前にカークウッドが小惑星の  $a$  分布におけるギャップを発見し、その後多くの研究がなされてきたわけであるが、現在でもなおギャップの形成のメカニズムとして満足のいく理論はない。今から十年ぐらい前までのギャップに関する研究状況はグリーンバーグとショルのレビュー (Greenberg and Scholl, 1979) にまとめられている。

最近、ウィズダム (Wisdom, 1982) が、 $3:1$  のレゾナンスにおいては小惑星の円に近い軌道が突然  $e > 0.3$  の楕円軌道になる場合があることを発見した。この場合、小惑星の  $a$  は変わらず  $e$  が大きくなるため、小惑星軌道の近日点はより太陽に近づくことになる。この結果よりウィズダムは  $3:1$  のギャップの起源として、“そこにあった小惑星の  $e$  が大きくなり火星と衝突 (または接近) することでレゾナンスの位置から除かれた”、

という説を提案した。さらに、レゾナンスにある小惑星はカオスの運動を示すということも調べられている (Wisdom, 1987)。その後の解析で、 $e$  の大きな変化は 3:1 以外の 5:2, 7:3, 2:1 レゾナンスでも起こることがわかってきた (吉川, 1989)。従ってこれらのギャップについてもウィズドムの上記の説と同様の説が成り立ち得ることになる。

レゾナンスにある小惑星の運動の一例をあげてみよう。ここでは、木星が 1 公転するとき小惑星が 2 公転する 2:1 レゾナンスをとりあげる。図 2 に示してあるようにこのレゾナンスは  $a=3.28$  AU で起こる。この値はケプラーの第 3 法則 ( $a^3/T^2=一定$ ,  $T$ : 公転周期) から出した値である。しかし、実際は木星からの力 (摂動) によってある幅を持った領域でレゾナンスは起こる。図 4 に 2:1 レゾナンスが起こる領域が示してある。この図は、角度に関する軌道要素がある特定の値をとったときに  $a-e$  平面上でレゾナンスが起こる領域を示したものである。この図より、ケプラーの第 3 法則で予想される位置のまわりはかなり広がった領域でレゾナンスが起こることがわかる。また図 4 には比較のために、レゾナンスの境界付近にある実際的小惑星の  $(a, e)$  もプロットしてある。この小惑星の  $a, e$  の値もレゾナンス領域を求めたときと同じ条件のときの値である。これより、実際的小惑星の分布の限界とレゾナンスの境界とが非常によく一致していることがわかる。つまり、小惑星は 2:1 レゾナンスを避けて分布しているといえる。これが、2:1 レゾナンスに対応したギャップである。ただし、図 4 では省略してあるが、現在例外的に 5 つの小惑星がこの 2:1 レゾナンスの中にある。これらの運動については今後解析を進めていく必要がある。

では、このレゾナンス領域の中に小惑星があったとしたらどのような運動を示すのであろうか。図 4 のレゾナンス領域の中などに多くの架空の小惑星をばらまいてそれらの軌道進化を調べてみた。その結果、初めの位置によって様々な軌道進化が起こることがわかったが、特に離心率が大きくなった例が図 5 の A である。図 5 には数値積分で求めた小惑星の  $e$  変化が示してある。比較のために図 5 C にレゾナンスにない一般的小惑星の代表

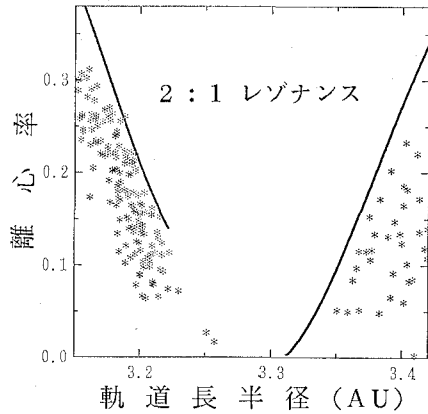


図 4 2:1 レゾナンスの領域とそのまわりの小惑星の分布。角度に関する軌道要素がある特定の値をとったときのレゾナンス領域と小惑星の軌道要素を示す。ただし小惑星のプロットにおいては、レゾナンス領域にあるもの 5 つと左下のレゾナンスの外にあるものについては省略してある。

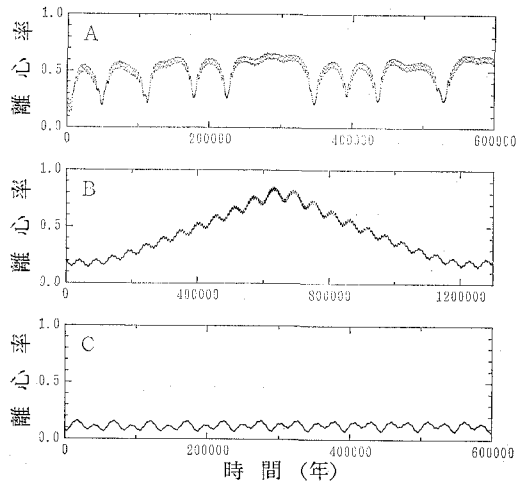
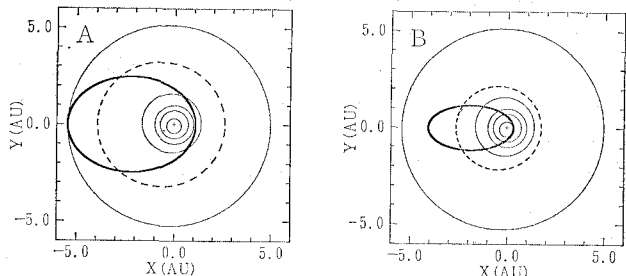


図 5 小惑星軌道の離心率の時間変化。木星と土星の摂動を考慮した数値積分で軌道の変化を求めたもの。A: 木星と 2:1 レゾナンスにある小惑星 ( $a=3.28$  AU), B: 永年共鳴  $\nu_6$  にある小惑星 ( $a=2.2$  AU), C: 共鳴状態にない小惑星の例 (セレス,  $a=2.77$  AU)。

図 6 共鳴状態にある小惑星の軌道の大きな変化。点線は初期の軌道であり、太い実線は離心率が最大になったときの軌道である。比較のために惑星軌道も示してある (最も外側の軌道が木星軌道である) が、この図は模式的なものであるため、小惑星軌道の長軸の方向は任意である。A: 木星と 2:1 にある場合 (図 5 A に対応), B: 永年共鳴  $\nu_6$  にある場合 (図 5 B に対応)。



としてセレスの  $e$  変化が示してある。レゾナンスにないと  $e$  はほぼ一定に保たれているのに対して、レゾナンスにあると  $e$  は大きく変化しようすがわかる。図5のAでは初期に  $e$  が 0.2 であったものが、最大 0.66 まで大きくなった。この場合  $e$  変化のタイムスケールは数万年から十万年程度である。この  $e$  の変化をよりわかりやすく図示したものが図6のAである。はじめは火星と木星の軌道のほぼ中間の点数の軌道であったものが、離心率が大きくなったとき太い実線の軌道まで変化するのである。この場合、小惑星の近日点が地球軌道にかなり接近することがわかる。レゾナンスにあるといつもほぼ同じところで小惑星が木星を追い越すことになるため、木星の影響が積み重なってこのように軌道を大きく変化させると考えられる。

カークウッドギャップに対応する他のレゾナンス (3:1, 5:2, 7:3) についても同様な結果が得られる。つまり、これらのレゾナンスにあると、たとえ初めの  $e$  が小さくてほぼ円軌道であったとしても時間がたつにつれて  $e$  が大きくなり、火星や地球、さらには金星や水星軌道まで小惑星の近日点が入り込むことがありうるのである。従って、小惑星がこれらのレゾナンスにあると内側の惑星に衝突したりかなり接近したりする可能性があることになる。そうすれば、もとの軌道から除かれてしまうわけで、レゾナンス領域がギャップになっていることが理解できる。ただし、これらのレゾナンスにあっては常に  $e$  が大きく変化するわけではないし、惑星軌道を見かけ上横切っても惑星と衝突するとは限らない（なぜなら、小惑星と惑星とは三次元空間を運動しているの、互いに衝突する確率は低い）ので、まだギャップの起源を完全に理解したことにはならない。それに、3:1, 2:1 レゾナンスには小惑星が少数ながら存在するので、これらがどうしてレゾナンスにあるのかも問題である。

カークウッドギャップに対応するレゾナンス以外のレゾナンスにおける小惑星の運動については以下のようなことがわかっている（吉川, 1989）: (1) 群に対応するレゾナンス (3:2, 4:3, 1:1) では、木星とあまり接近しない状態であれば、小惑星の  $e$  は大きく変化しない。(2) 4:1 レゾナンス (主小惑星帯の内側の縁に位置する) では  $e$  が非常に大きくなりほとんど1近くまでになる。(3) 7:2, 8:3 レゾナンスでは、 $e$  がある程度大きいときには、この後述べる永年共鳴  $\nu_6$  が同時に起こり、百万年のタイムスケールで  $e$  が大きく変化する。

このように、木星と公転周期におけるレゾナンスにある小惑星はかなり複雑な運動をする。今後もより一般的な系（多くの惑星の摂動を考慮した系）で解析を進めていく必要がある。

### 3. 永年共鳴 $\nu_6$ にある小惑星の運動

小惑星の近日点の位置は惑星の摂動によりゆっくり動いているし、また惑星の近日点も惑星どうしの摂動でゆっくり動いている。つまり、小惑星や惑星の楕円軌道の向きが時間とともに変化しているのである。2つの天体の公転周期がある特別な関係にあるとき前述の公転周期における共鳴現象が起こるわけであるが、2つの天体の軌道の動きが特別な関係にあるとき、永年共鳴と呼ばれる別の共鳴現象が起こる。特に永年共鳴  $\nu_6$  とよばれるものは、小惑星の近日点が土星の近日点と似た角速度で動くとき起こる共鳴現象である。土星の近日点が太陽の周りを一周するのに約5万年かかるから、この共鳴現象は数万年の周期どうしの共鳴である。これに対して、公転周期における共鳴現象は、木星の公転周期（約12年）での共鳴であるから、永年共鳴とは全くタイムスケールが異なっている。この永年共鳴  $\nu_6$  が起こる領域は図3に示されている。

最近、この永年共鳴  $\nu_6$  にある小惑星の運動が調べられてきた (Froeschlé and Scholl, 1986; 吉川, 1987)。この共鳴における運動の一例を図5のBに示す。これは、初期に  $a=2.2$  AU,  $i=10^\circ$  のところにおいた架空の小惑星の  $e$  変化を示したものである。初期の  $e$  は 0.2 であったが、約60万年後には  $e=0.85$  まで大きくなった。図5より、永年共鳴  $\nu_6$  においては、非常に長いタイムスケール（約百万年）で  $e$  が変化しようすがわかる。軌道変化の図を示すと図6Bのようになる。この場合、火星軌道の外側にあったものが水星軌道の内側にまで入り込むことがわかる。このように離心率が大きく変化する原因は、木星の離心率が土星との相互作用で周期的に変動することに関係している。木星の  $e$  の変動が一種の強制振動となって小惑星に伝わり、小惑星の  $e$  が大きく変化することになるのである。

図3に示すように、小惑星帯ではこの永年共鳴  $\nu_6$  が起こる付近に幅の広いギャップが見られるが、実際、永年共鳴  $\nu_6$  にある小惑星はごくわずかであることが知られている。従って、永年共鳴  $\nu_6$  のところにある幅の広いギャップも、カークウッドギャップと同様に“小惑星の  $e$  が増大し惑星と遭遇することで共鳴の位置から除かれた”というシナリオを考えることができる。ただし、この永年共鳴にあっては初期値によっては  $e$  が大きく変化しない場合もあることも注意しておく。

永年共鳴にはこの  $\nu_6$  の他にいくつかあるが、主小惑星帯にはもう一つ重要な永年共鳴がある。それは、小惑星の昇交点（天体の軌道が基準面と交わる点の1つ）が木星や土星の昇交点と似た角速度で動くときに起こるもので、永年共鳴  $\nu_{16}$  と呼ばれている。こちらの永年共鳴

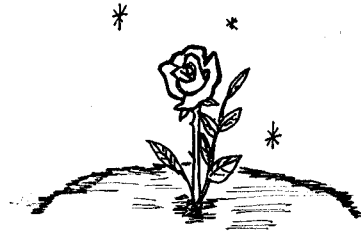
では、小惑星の軌道傾斜角が大きく変化する（中井・木下, 1985）。

#### 4. さいごに

小惑星が木星と公転周期における 4:1, 3:1, 5:2, 7:3, 2:1 のレゾナンスないし永年共鳴  $\nu_6$  にあると、小惑星軌道の離心率が大きく変化しうる。この離心率の大きな変化は、数万年ないし百万年というタイムスケールで起こるが、これは太陽系の年齢の 45 億年に比べれば非常に短いものである。一方、主小惑星帯で小惑星がほとんど分布していないところ（ギャップ）は、これらのレゾナンスが起こる領域に対応しているのである。小惑星の軌道の離心率が大きくなると、惑星軌道と交差することになり、惑星と遭遇する確率が大きくなる。つまり、このような軌道は小惑星にとっては危険なわけであり、現在観測される小惑星はこのようなレゾナンスを避けているのである。というよりは、このような「危険」なレゾナンスが起こらないところに小惑星が残ったと言わなければならない。おそらく、小惑星帯が形成されたころには、このようなレゾナンスの中にも多くの小惑星が存在していたと考えられるが、そのころはここでみたようなレゾナンスの影響で小惑星軌道の離心率が大きくなり、内側の惑星との遭遇を繰り返していたと思われる。いずれにしても、現在は離心率が大きくなるレゾナンスには小惑星はほとんど発見されていないわけであり、このことは我々地球上に住むものにとっては幸いである。というも、もしこういうレゾナンスにまだたくさん的小惑星が残っているとすると、小惑星が地球と衝突する可能性が大きくなってしまふからである。ただし、地球に落ちて来る隕石のなかにはこのようなレゾナンスに起源を持つものもあると考えられている。つまり、ここでみたレゾナンスが小惑星帯と地球とをむすぶ 1 つの“道”となっているのである。

現在までの研究で、小惑星の分布は小惑星帯の力学的な性質に大きく影響されていることはわかってきた。しかし、カークウッドギャップや群、族の起源についてはまだ十分に理解されているわけではないし、小惑星全体の分布を説明することもまだなされていないというのが現状である。小惑星帯の力学的性質について調べることは、小惑星の軌道進化という問題を解く上だけでなく、太陽系の進化やその起源を理解する上でも重要なことである。今後も、天体力学的な解析を進めていくとともに、力学以外のアプローチも含めて、小惑星に対する総合的な理解を目指していく必要がある。

さて、星の王子さまの小惑星 B-612 がはたしてここでみたようなレゾナンスにあるかどうかはわからない。しかし、もしレゾナンスにある小惑星であったとすれ



ば、B-612 の離心率が大きくなり地球に接近したときに、王子さまが地球におりてきたのかもしれない。そうだとすると、あと数万年ないし百万年程度待てば B-612 が再び地球に接近して王子さまがまた地球に降り立つことがあられるかもしれない。

……王子さまは、しばらくだまっていたあとで、また、こういいました。

「星があんなに美しいのも、目に見えない花が一つあるからなんだよ……」

ぼくは、〈そりゃあ、そうだ〉と答えました。それから、なんにもいわずに、でこぼこの砂が、月の光を浴びているのをながめていました。

「砂漠は美しいな……」と、王子さまはつぶいていきました。

まったくそのとおりでした。ぼくは、いつも砂漠がすきでした。砂山の上に腰をおろす。なんにも見えません。なんにもきこえません。だけれど、なにかが、ひっそりと光っているのです……

「砂漠が美しいのは、どこかに井戸をかくしているからだよ……」と、王子さまがいきました。

とつぜん、ぼくは、砂がそんなふうに、ふしぎに光るわけがわかっておどろきました……

「そうだよ、家でも星でも砂漠でも、その美しいところは、目に見えないのさ」と、ぼくは王子さまにいました……  
（“星の王子さま”より）

ここで示した計算結果や図は、国立天文台の天文学データ解析計算センターの大型計算機を利用して得られたものである。また、この研究の一部は、文部省科学研究費補助金によってなされたものである。イラストは渡部好恵氏による。参考文献を以下に示す。

- 星の王子さま：サン＝テグジュペリ作，内藤 濯訳（岩波少年文庫 2010）
- Froeschlé, Ch., Scholl, H.: 1986, *Astron. Astrophys.* **166**, 326.
- Greenberg, R., Scholl, H.: 1979, in *Asteroids*, ed. T. Gehrels, Univ. of Arizona Press, Tucson, 310.
- Kozai, Y.: 1979, in *Asteroids*, T. Gehrels, Univ. of Arizona Press, Tucson, 334.
- Nakai, H., Kinoshita, H.: 1985, *Celestial Mechanics* **36**, 391.
- Wisdom, J.: 1982, *Astron. J.* **87**, 577.
- Wisdom, J.: 1987, *Icarus* **72**, 241.
- Yoshikawa, M.: 1987, *Celestial Mechanics* **40**, 233.
- Yoshikawa, M.: 1989, *Astron. Astrophys.* **213**, 436.