

地球接近小惑星

—その運動の力学的特徴について—

吉川 真

〈ニース天文台* / 郵政省・通信総合研究所鹿島宇宙通信センター 〒314-0012 茨城県鹿嶋市鹿島町平井893-1〉
e-mail: makoto@crl.go.jp

* 1996年12月より1年間、フランス・ニース天文台に滞在

最近、発見される小惑星の数が急速に増え、発見される場所も地球軌道の内側から冥王星軌道の外側まで非常に広範囲にわたってきている。また、探査機によって小惑星の素顔も見ることができるようになり、「小惑星」というものの描像が大きく変わりつつある。ここでは、特に地球軌道付近に来る小惑星の力学的特徴について、最近の面白い話題をいくつか紹介することにしたい。

1. 木曾で特異小惑星を発見

1997年1月16日、木曾観測所（東京大学理学部）で暗い銀河の観測を行っていた長谷川 隆氏は、目的の天体とは全く別の天体を発見した。それは、1997BQと名付けられた小惑星である¹⁾。

この小惑星は、数多く発見されている「普通」の小惑星ではなかった。これは、アポロ型の特異小惑星であったのである。後述するが、アポロ型小惑星というものは、地球に接近する可能性のある小惑星である。小惑星の発見については、日本はアマチュア天文家が非常に活躍していて、世界でも有数の小惑星発見国となっている。しかし、このような特異小惑星の発見は珍しい。

この小惑星が普通の小惑星と比べてどのくらい変わっているかをみるために、地球から見たみかけの運動を示してみることにする（図1）。この図には他の小惑星の位置も示されているが、大多数の小惑星は、黄道に沿って「天の川」のように分布している。つまり、普通の小惑星はこの帯状の領域を移動しているわけである。ところが、

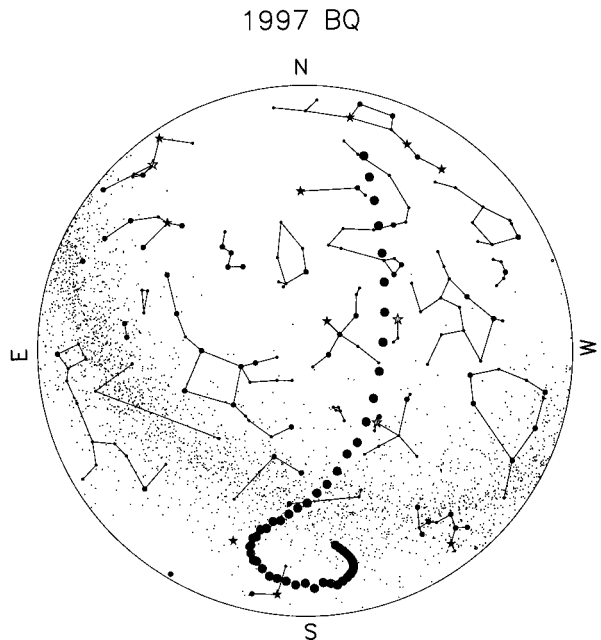


図1 小惑星1997BQの見かけの運動と小惑星の分布。図中の○印が小惑星1997BQの位置である。この小惑星は図中で上（1997年2月1日）から下（1997年10月19日）へと移動した。○印は5日おきにプロットしてある（参考文献2）のデータを使用。小さな点は軌道が正確に求まっている小惑星（確定番号が付いているもの、約7千8百個）について1997年8月7日の位置をプロットしたものである。



1997BQは、全く異なった移動の仕方をしている。その理由は、図1に描いた期間については、この小惑星が地球に接近しており、見かけの方向が非常に大きく変化したためである。

普通、小惑星を発見するには小惑星がたくさん見られる黄道帯を観測するのが効率がいい。しかし、1997BQのような特異小惑星については、特にそれが地球に接近しているとき、夜空のどこに見られるのかわからない。地球に接近してくるような小惑星は小さいものが多いので、接近しないとなかなか発見できないのだが、このように接近すると搜索すべき場所が特定できなくなる。ということで、地球に接近するような小惑星を発見するのは難しいのである。長谷川氏の発見は、「運命の女神」がほほえんでくれたため³⁾である。

2. 相次ぐ発見

しかし、最近になって、このように地球に接近するような小惑星が続々と発見されるようになった。それは、このような天体が地球に衝突する可能性があるという認識が研究者の間でも広がり、いくつかのグループが精力的に地球に接近する小惑星を発見する活動を行っているからである。

図2には、ある時刻における小惑星の位置を黄道面に投影したものを示す。ここでは特に火星軌道の内側を拡大して示してあるが、この領域にもずいぶん小惑星があることがわかるであろう。

特に、地球に接近する特異小惑星については、その軌道の特徴によって、アポロ型、アモール型、アテン型というような分類がなされている。それぞれ、その型に属する代表的な小惑星の名前を取って呼ばれているわけであるが、これらのグループの特徴は直感的には次のように表現できる。

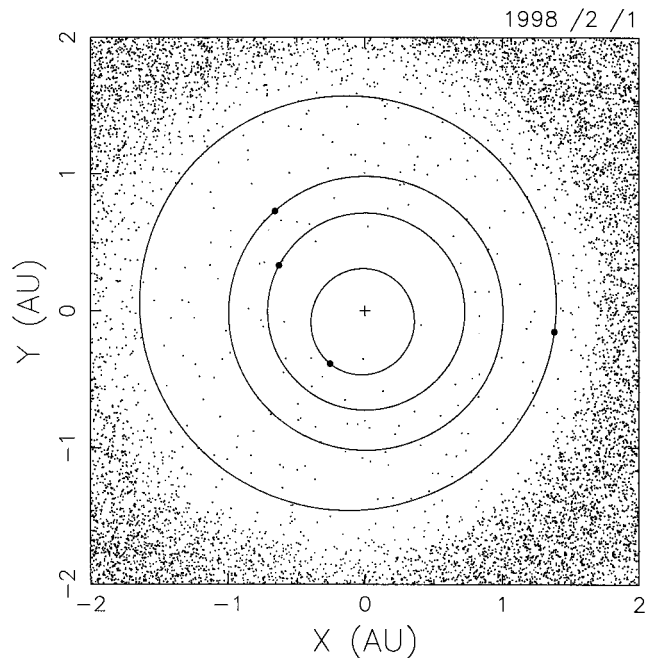


図2 1998年2月1日の小惑星の分布。小さな点が、各小惑星の位置を示すが、この位置は黄道面に投影したものである。軌道は、内側から水星、金星、地球、火星である。小惑星のデータは参考文献4)より。

-
- アポロ型：大部分は地球軌道の外側を運動しているが、近日点で地球軌道の内側に入る。
 - アモール型：地球軌道の外側を運動していて地球軌道と交差することはないが、地球軌道に0.3天文単位以内まで近づく。
 - アテン型：大部分は地球軌道の内側を運動しているが、遠日点で地球軌道の外側に出る。
-

つまり、アポロ型とアテン型については地球軌道と交差しているので、地球との衝突の可能性があるし、アモール型についてはすぐには地球と衝突することはないが、軌道が少し変化すればアポロ型小惑星になるというものである。ここで軌道が交差すると言っているのは、黄道面（地球の軌道面）に軌道を投影して見た場合である。一般に軌道は傾いているので、上記の意味で軌道が交差してい



も、必ずしも軌道同士が本当に交点を持っているわけではない。

さて、このような特異小惑星であるが、そのリストはマイナープラネットセンターの WWW のホームページ⁹⁾に掲載されている。1997 年の 11 月 5 日現在、アポロ型小惑星が 204 個、アモール型小惑星が 202 個、アテン型小惑星が 27 個発見されているということである。つまり、地球に近づきうる小惑星が、すでに 430 個余り発見されているのである。

では、このような地球に接近しうる小惑星は、いくつくらい存在するのであろうか。正確な数は誰も分からないが、直径が 1 km 以上の小惑星で地球軌道のそばに来るものは、少なくとも 2 千個はあるだろうという推定を多くの研究者が受け入れている。さらに、この倍くらいの数を指摘している人もいる。いずれにしても、現在発見されている 430 個余りという数は、まだ全体の 1, 2 割にしかすぎないのである。

3. 地球にも「コンパニオン」

このように、新しい小惑星がどんどん発見されているが、かなり前に発見された小惑星についても面白い性質が見いだされることがある。Wiegert ら⁶⁾によると、以前発見されていた小惑星 3753 が地球の「コンパニオン小惑星」であるという。この場合の「コンパニオン」とは、力学的に地球との関係が深いということであるのだが、以下で簡単に説明する。

その前に、トロヤ群小惑星というものについて簡単に触れておこう。これは、太陽と木星と小惑星が正三角形をなすような位置付近に、小惑星が群をなして存在しているものである。理論的には、ラグランジュによって 18 世紀後半に詳しく解析されたものであり、ラグランジュの正三角形平衡解としても有名である。現在では、木星のトロヤ群小惑星は 400 個ほど発見されている。また、最近になって、火星にもトロヤ群と同様な小惑星がある

ことが分かった。それは、1990 年に発見された小惑星 5261 (Eureka) で、火星-太陽が作る正三角形解のうち火星を追いかける方に存在している⁷⁾。

さて、このような天体が地球については存在しないのであろうか。実は、先に述べた小惑星 3753 が地球についての「トロヤ群」なのである。ただし、この小惑星は木星や火星のトロヤ群とはちょっと違った運動をしている。その様子を図 3 でみることにする。(図 3 には、地球の公転運動と同期して回転する回転座標系における小惑星の軌道を、黄道面に投影したものが描かれている。回転座標系に乗ると、軌道の形が全く別のものになってしまうことに注意してほしい。慣性系で見れば、小惑星 3753 も太陽のまわりを楕円軌道を描いて運動しているだけである。)

まず、小惑星 3753 の動きを短期的に見ると、地球の前方で「インゲン豆」のような形の軌道を描いていることがわかる(図 3 a)。つまり、常に地球の進行方向にあり、ほぼ 1 年の周期で地球に近づいたり遠ざかったりしているのである。この「インゲン豆」1 つは、小惑星が太陽のまわりを 1 周する周期に一致している。そして、これは時間が経つにつれてだんだんとより前方に移動していき(図 3 b)、最後には地球のすぐ後方まで来てしまう(図 3 c)。このような運動は、ホースシュー(馬蹄型)軌道として、力学ではよく知られているものである。ラグランジュの正三角形解の場合には、その正三角形の頂点付近で運動するのだが、ホースシュー軌道の場合は、この馬蹄形の領域で運動することになる。

ところが、この小惑星の場合、それだけでは終わらない。さらにもう少し長期に運動を調べると、その運動領域は地球を飲み込んでしまい、一見、ドーナツ状の領域となってしまう(図 3 d)。この場合でも、実は 1 周期を表す「インゲン豆」型軌道は、ホースシュー軌道と同様な運動をしている。言葉ではなかなか分かりやすく表現できないが、たとえば図 3 a に描かれている「インゲン豆」型

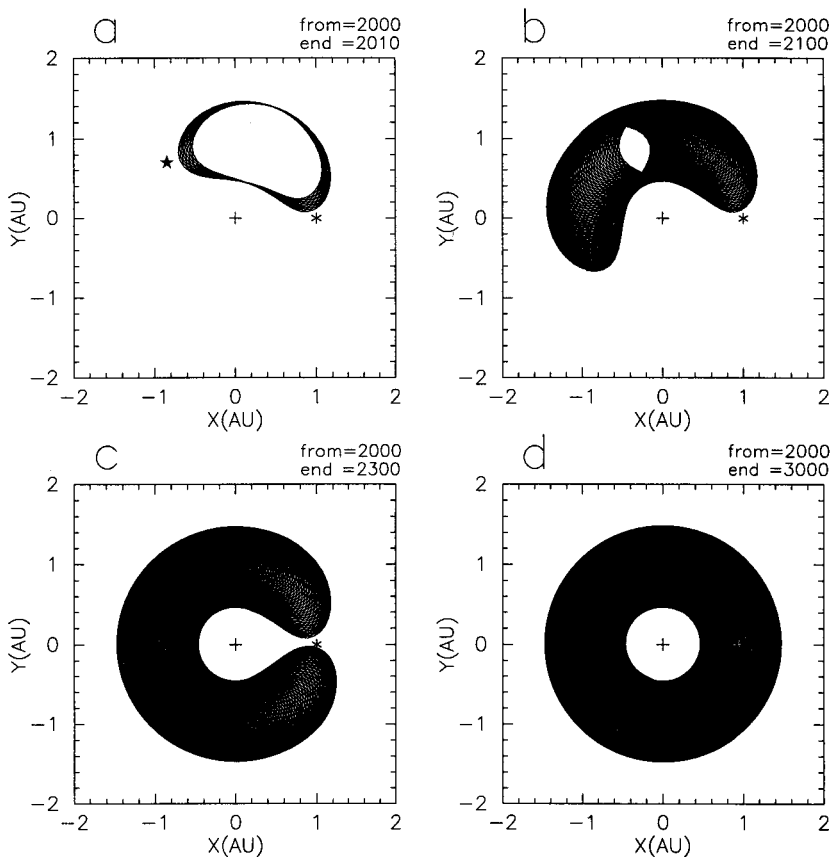


図3 小惑星 3753 の軌道。ここでは、地球の公転運動と一緒に回転する座標系に乗って見た図を示す（本文参照）。小惑星の軌道は、黄道面に投影したものである。それぞれ、図右上に示されている期間（数字は西暦の年）についての軌道が描いてある。なお、座標（1，0）にある*印は地球の位置で、この回転座標系では地球は固定されている。また、原点の+印は太陽である。図aの★印については本文を参照。（計算は筆者による）

軌道の左端の部分（★印）に着目すると、この部分は地球を挟んで馬蹄形の運動をしているのである。

気になることに、図3 dを見ると地球の上に小惑星の軌道が重なっており、あたかも小惑星と地球が衝突するかのように見える。しかし、衝突は起こらない。それは、この小惑星の軌道傾斜角が20度ほどあり、地球と軌道が重なって見えるところは空間的には離れているからである。また、このように地球に制御されているような軌道を持っているので、地球と衝突する可能性も今のところない。

ただし、このように制御された運動をしているのは一時的であり、過去のある時点で現在のような軌道に捕らえられ、未来のある時にはまた‘コンパニオン’状態から離れてしまう可能性が高い。このような運動は、特にカオス的な運動をする小惑星や彗星の軌道計算をしているときどき生じるものである。現存する天体としては、地球のコンパニオンと確認されたのはこの小惑星が初めてである。（注：ホースシュー軌道にある天体としては、土星の衛星のヤヌスとエピメテウスが知られている。）

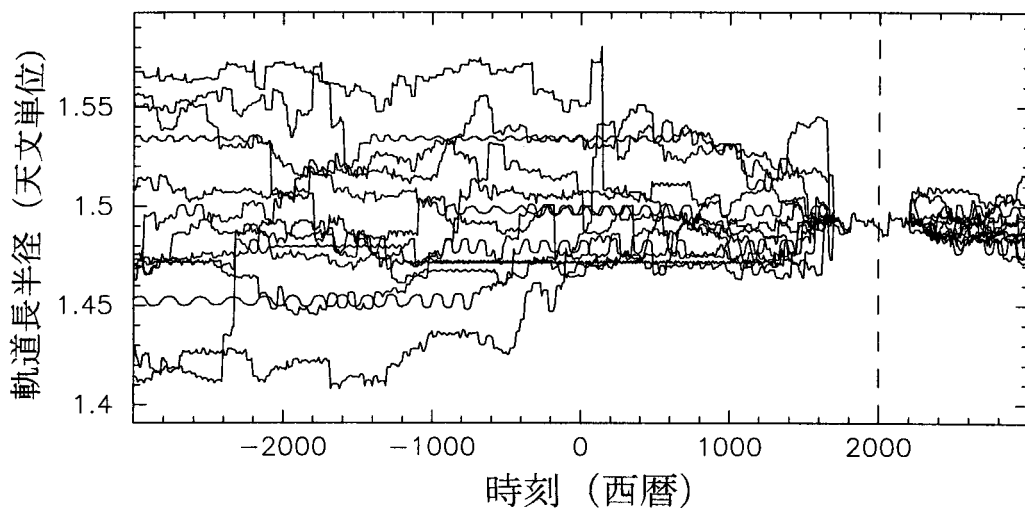


図4 小惑星ネレウスの軌道進化。現在の軌道要素およびそれを少しだけずらした軌道12個の合計13の初期条件について、過去へ5千年間、未来に千年間軌道運動を計算した結果である。ここでは、軌道長半径の変化を示した。点線が現在の時刻（計算開始時刻）である。（計算は筆者による）

4. 運動はカオス

前節ですでに「カオス」という言葉を使ってしまったが、地球に接近するような小惑星の運動の特徴を一言でいえば「カオス」ということになる。

運動がカオスとはどのようなことであろうか。その数学的に厳密な定義はさておいて、直感的に言えば、初期条件がちょっとだけ違っただけで、将来は全く違ったところに行ってしまう、というような運動である。天体の運動の場合、非常に長い時間（例えば太陽系の年齢に匹敵する50億年など）を考えれば、たとえカオスでなくても初期条件の微妙な違いが非常に大きく拡大されるようなことはある。その意味では、天体の運動はすべてカオス的だとも言えそうであるが、地球に接近するような小惑星の運動がカオスであると言う場合にはそのタイムスケールが非常に短い。例えば、数百年とか数千年程度の時間で、カオスが顔を出してくるのである。（少しだけ数学的に言うと、初期条件の微妙な違いが指数関数的に拡大する場合をカオスと呼ぶ。）

その様子を図4に示す。これは、探査の候補に

もあがっている小惑星ネレウス（確定番号4660）の軌道進化である。ここでは、まず、現在、決定されている軌道要素を用いて過去に5千年間、未来に千年間その軌道を計算した。次に、軌道6要素の1つ1つについて、有効数字の最小の桁を1ずつ増減させた軌道（全部で12個）について、同様な計算を行なった。そして、13個の結果をすべて重ね合わせて示したものが図4である。

図4を見てわかるように、出発時刻から過去と未来ともに2百年くらいはすべてが同じ軌道進化をしているが、それより長くなると全く軌道進化が異なってしまうことが分かる。つまり、ネレウスの軌道進化を調べる場合、せいぜい数百年間程度しか信頼のおける結果が出せないということになる。

この軌道進化のずれは、もちろん、より長期に計算すると顕著になる。Michelら⁸⁾は、このネレウスと小惑星エロス（確定番号433）について2百万年間にわたって数値計算を行った。彼らも初期値を少しずらした計算を行って軌道進化を比較しているが、計算期間が長いとその進化の違



いは図4よりずっと大きなものになっている。

さらに、彼らは全く同一の初期条件ではあるが異なる計算機を用いて計算した結果も示している。異なる計算機を使ったということは、数値の扱いにおいて異なる丸め誤差を導入したことに相当するが、計算結果は全く異なるものになっている。つまり、全く同じ条件で計算しているにもかかわらず使う計算機が違うということで結果が異なってしまうのである。このことから、カオスにある天体の運動を長期的に正確に計算することは不可能であるということがわかる。

では、地球に接近するような小惑星の軌道運動はなぜカオスになるのであろうか。その理由は2つある。最も大きな理由は、このような天体が地球や他の地球型惑星（水星、金星、火星）に接近するような軌道を持っているためである。天体同士が接近することをクローズエンカウンターとかニアミスとか呼ぶが、火星軌道より内側に入ってくるような小惑星の大部分は長期的に見れば内側の惑星と必ずニアミスを起こす。ニアミスが起こると軌道が大きく変えられてしまうが、ニアミスでは微妙なタイミングによって軌道の変化の仕方が異なってしまう。そのために、初期条件の微妙なずれが、どんどん拡大してしまうのである。

もう1つ理由がある。それは、火星軌道より内側の領域でも、各種の「共鳴現象」が起こっていることである。ここでは「共鳴」について詳しく触れる余裕がないが、メカニズムが異なる2種類の共鳴がある。1つは公転周期における共鳴で、ある惑星の公転周期と小惑星の公転周期が簡単な整数比になっているときに起こるものである。この共鳴の影響は、小惑星帯では顕著に見られる⁹⁾。もう1つの共鳴は、「永年共鳴」というもので、軌道の近日点や昇

交点の動きが惑星と小惑星とで一致するときにかかる。これも小惑星帯では重要な働きをしている共鳴である¹⁰⁾。

共鳴現象については、今までは主に小惑星帯について調べられてきたが、Michelら¹¹⁾によると、小惑星帯より内側の領域でも各種の永年共鳴が存在しているという。また、公転周期についての共鳴は、もちろん太陽系のどの領域でも存在しうるのである。これら2種類の共鳴現象によっても、小惑星の軌道進化がカオス的になるのである。

加えて、3番目の共鳴現象とも言える「古在共

表1 現在までの小惑星の地球接近（接近距離順）

小惑星の名前	接近距離 (万 km)	接近した時刻 (世界時：年月日)
1994 XM1	10	1994 12 9.8
1993 KA2	15	1993 5 20.9
1994 ES1	16	1994 3 15.7
1991 BA	16	1991 1 18.7
1995 FF	43	1995 3 27.2
1996 JA1	45	1996 5 19.7
1991 VG	46	1991 12 5.4
(4581) Asclepius	69	1989 3 22.9
1994 WR12	72	1994 11 24.8
1937 UB (Hermes)	73	1937 10 30.7
1995 UB	75	1995 10 17.2
1993 UA	100	1993 10 18.8
1994 GV	103	1994 4 12.1
1993 KA	106	1993 5 17.9
1997 CD17	111	1997 2 9.8
(2340) Hathor	117	1976 10 20.7
1988 TA	148	1988 9 29.0

注：(1) この表はマイナープラネットセンターが公開しているデータに基づいて作成された⁹⁾。

(2) 日付の少数は時刻を示す。例えば、9.8日というのは9日の19時頃になる。

(3) 1991 VGは人類が打ち上げたロケットの破片である可能性がある。

(4) 1995 FFは1995年3月27.0日に月に19万 kmまで接近した。

鳴」というものがある。これは、元国立天文台長の古在由秀氏の研究¹²⁾にちなんで名付けられているものであり、軌道要素のうち近日点引数に関連する共鳴である。詳細は省略するが、古在共鳴が起ると軌道が安定化する傾向がある。つまり、カオスとは逆のセンスで働くものであるが、この古在共鳴が地球に接近するような小惑星についても起こることが最近分かってきた (Michel ら¹³⁾)。

このように、地球近傍の領域は、力学的には非常に複雑であり、そこを運動している小惑星の軌道進化も複雑になっているのである。

5. 地球衝突の可能性と今後

最後に、一番気になるところの地球との衝突の可能性について触れてみるつもりだったが、紙面が無くなってしまったので、また別の機会に譲りたい。結論だけ述べれば、「現在発見されている小惑星が近い未来に地球に衝突する可能性はない」ということになる。これは我々を安心させる情報であるが、当然ながら発見されていないものについては何とも言えない。したがって、地球に接近するような小惑星をすべて探そうという取り組みが始まっているのである。

参考までに、今までに地球に接近したことが観測された小惑星について、その‘ニアミス・ランキング’を表1に示す。この表を見ると、地球一月の距離である38万キロメートルより近いところを通過していくような天体すら観測されていることがわかる。

最近では、小惑星の観測手段もかなり変化してきている。以前は地上からの光学観測しかなかったわけだが、現在はレーダー電波を小惑星に当て、そのエコーを観測することがアメリカを中心に活発に行われており、日本もこの観測に参加している¹⁴⁾。さらに、探査機が小惑星のそばをフライバイしてその表面の写真を送ってくるようになった。そして、日本の宇宙科学研究所を中心にして、小惑星の表面物質を地球に持ち帰ろうという

計画も進んでいる。

今後、小惑星はますますいろいろな話題を提供してくれるはずである。

参考文献

- 1) Minor Planet Electronic Circular (MPEC) 1997-B12
- 2) MPEC 1997-C06
- 3) 長谷川 隆. 1997, あすてろいど 20号 10-13 (「あすてろいど」とは日本スペースガード協会の機関誌. ここに、長谷川氏による小惑星発見の経緯が掲載されている。「あすてろいど」はWWWでも公開されており、アドレスは、<http://www.crl.go.jp/ka/control/asteroid/asute/index-j.html>)
- 4) Lowell Observatory の Edward Bowell による. ホームページ: <http://www.lowell.edu/users/elgb/> anonymous ftp: <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/>
- 5) Minor Planet Center のホームページのアドレスは <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>
- 6) Wiegert, P.A., Innanen, K.A., and Mikkola, S. 1997, NATURE, 387, 685
- 7) Mikkola, S., Innanen, K., Muinonen, K., and Bowell, E. 1994, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 58, 53
- 8) Michel, P., Froeschle, Ch., and Farinella, P. 1996, A & Ap, 313, 993
- 9) Moons, M. 1997, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 65, 175
- 10) 吉川 真. 1989, 天文月報, 82, 280
- 11) Michel, P., Froeschle, Ch. 1997, ICARUS, 128, 230
- 12) Kozai, Y. 1962, AJ, 67, 519
- 13) Michel, P., Thomas, F. 1996, A & Ap, 307, 310
- 14) Alexander L. Zaitsev et al. 1997, Planet. Space Sci., 45, 771

The Recent Topics on the Dynamical Properties of Near Earth Asteroids

Makoto YOSHIKAWA

Nice Observatory / Communications Research Laboratory, Hirai, Kashima, Ibaraki 314-0012

Abstract: Many asteroids that approach the orbit of the earth (Near Earth Asteroid : NEA) have been found recently. In this article, interesting dynamical properties that were found in these two years for such asteroids are quickly reviewed. One of the such properties is the dynamical companion of the earth and the other one is chaotic motions of NEA. NEAs have various dynamical properties and they are interesting targets for investigation.