

小惑星のニアミス現象

—地球との衝突はありうるか—

吉川 真*

NEAR-MISS OF ASTEROIDS —COLLISION WITH THE EARTH?—

By

Makoto YOSHIKAWA

At present, the orbital elements of more than 5,500 asteroids have been determined, and this number is increasing as fainter asteroids are discovered. Moreover, recently we have observed some asteroids that have approached to the earth very closely. As a result the possibility of asteroids colliding with the earth should be considered. In this paper, first the distribution and the motion of asteroids are summarized, and it is shown that the features of distribution are closely related to the dynamical properties of the asteroids. Then, the results of analysis of the near-miss phenomena are discussed. In this analysis, we calculated the orbital motions of 4,506 numbered asteroids, taking into account the effect of the gravitational attraction between asteroids as well as the perturbation of nine planets. The calculation was carried out for a period of about 130 years into the future, and close encounters between the earth and asteroids of less than 0.2 AU were monitored. Using this calculation, we found that many asteroids will come close to the earth, but there is no possibility of collision. Therefore, there is no need to worry about the earth colliding with known asteroids at present. However, there are many unknown asteroids, so we should extend our observations in order to discover them.

[キーワード] 小惑星, 天体力学, 天体の衝突, 太陽系.

Asteroid, Celestial mechanics, Collision, Solar system.

1. はじめに

太陽系は、様々な階層の天体—太陽・惑星・衛星・小惑星・彗星・惑星間塵などによって構成されている。この中で特に小惑星や彗星などの小天体は、隕石などのごく微小な天体に比べればかなり大きな天体でありながら、非常に多く存在している。そのために、これらの小天体による衝突現象というものは太陽系規模の空間や時間のスケールで見れば、頻繁に起こっていることなのである。

最近、天体の衝突という話題がかなり頻繁にマスコミに取り上げられるようになった。1992年の秋から現在(1993年8月)までに話題となっている主な事項をまとめてみると第1表のようになる。

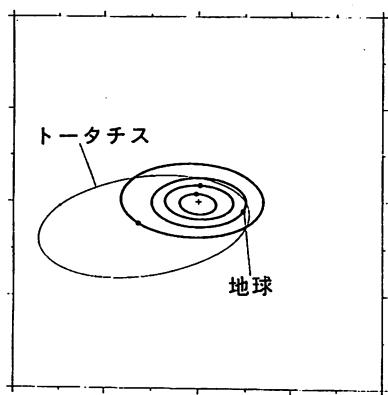
まず、1992年の9月・10月には小惑星トータチスやスイフト・タットル彗星が地球に衝突するかも知れないというニュースが、各マスコミでかなりセンセーショナルに報道された。しかし、詳しい計算によると衝突の確率はかなり低いことがわかり、現在では近い将来に衝突が起こる可能性は否定されている。

ただし、これらの天体の軌道が現在、地球軌道にかなり接近したものになっているということは事実である。第1図および第2図にこれらの天体の軌道と惑星の軌道の関係を示す。小惑星トータチスの方は、地球軌道に水平に接触する感じで地球軌道に接近しているし、スイフト・タットル彗星の方は、地球軌道と直交するような形で交差していることがわかる。仮に、ちょうどよいタイミングで地球とこれらの天体が巡ってくれば、かなり接近はするし、さらには衝突が起こることも否定はできない。地球軌道に接近した軌道を持つ天体はこの他にも多

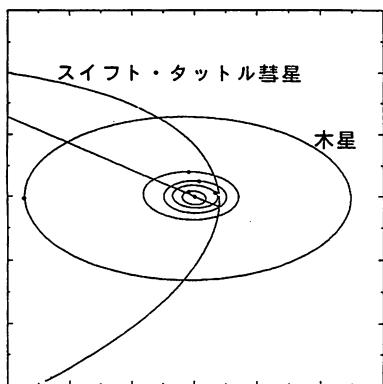
* 関東支所 宇宙制御技術研究室

第1表 天体の接近・衝突に関する最近の話題

年・月・日	話題
<1992年>	
9月	小惑星トータチスが西暦2000年に地球に衝突する可能性を指摘した記事が、フランスの雑誌 'Sciences et Avenir' に掲載される。
10月	スイフト・タットル彗星が西暦2126年に地球にかなり接近する可能性が指摘される。
12月8日	トータチスが地球に約350万キロメートルまで接近する。
12月10日	島根県美保関町の民家に重さ 6 kg 余りの隕石が落下する。
<1993年>	
8月12日	ペルセウス流星群が出現する。(ただし、予想されていたほど多くは観測されなかった。)
<1994年>	
7月	木星にシューメイカー・レビー第9彗星が衝突する?



第1図 惑星（水・金・地・火）と小惑星トータチスの軌道。



第2図 惑星（水・金・地・火・木）とスイフト・タットル彗星の軌道。

く存在しているから、そのような天体を考慮すれば、衝突の確率は高くなる。しかし、天体の軌道は少しづつ変化しているし、衝突が起こる条件は非常に限られたものであるため、人間の一生程度の短い時間の間に比較的大きな天体と地球が衝突を起こす確率というのではなくなり小さい。

さて、一連の衝突の報道のすぐ後には、実際にトータチスが地球に接近したり、民家に隕石が落ちたりして、注目を集めた。トータチスについては、レーダーによってその形の観測が行われ、この小惑星があたかも 2 つの天体がくっついているかのような形状をしていることがわかった。

また、1993年8月のペルセウス流星群は、その母天体であるスイフト・タットル彗星が近日点を通過した直後であるだけに、かなりの数の流星が流れるものと予測されていた。実際には、予想されていたほどは流れなかったが、それでもかなり明るい流星が各地で観測されたようである。流星群でなくても、流星は毎晩のように見られるものである。つまり、流星のもとになるような非常に小さい塵と地球との衝突というものは、日常的に起こっている現象なのである。

さらに、1994年の7月には、シューメイカー・レビー第9彗星がほとんど確実に木星に衝突するのではないかと考えられている。これは、人類が初めて実際に観測することになるかなり大きな衝突現象となるはずであり、どのように観測し解析したらよいのか、現在、様々な検討がなされている。

一方、地球上に目を移してみると、ユカタン半島に比較的大きなクレーターの跡（チクシループ・クレーター）が最近発見された。このクレーターの形成年代を測定してみたところ、ちょうど 6500 万年前の白亜紀から第三紀に移るとき、つまり恐竜が絶滅したときに対応することがわかった。従って、恐竜は小惑星のような小さな天体の衝突によって滅ぼされたとする説を裏付ける 1 つの証拠となっているのである。

このように、最近、天体の衝突という問題が地球の外の世界だけでなく地球上においても注目を集めている。従って、様々な解説や本も出版されている⁽¹⁾。ここでは、特に「小惑星」というものを中心にして、地球と天体の衝突について考察してみることにする^{(2)~(4)}。以下では、まず天体の衝突について簡単に述べた後（2章）、小惑星の分布（3章）や地球に到達するメカニズム（4章）についてまとめ、そして小惑星の地球へのニアミスについての解析結果を報告する（5章）。ここで、あらかじめこの文章で述べる内容の要点を示しておく。

・天体の地球への衝突は常に起こっている現象である。

ただし、衝突頻度は、天体の大きさが大きくなるほど低くなる。

- ・現在得られているデータに基づく限り、近い未来にある程度大きな天体が地球に衝突する可能性は小さい。
- ・しかし、地球への天体のニアミスは想像以上に起こっているため、観測体制の整備や軌道解析に力を入れていく必要がある。

なお、この文章は「平成5年度科学技術週間講演会」における講演内容に基づいて書かれたものである。

2. 天体の衝突

天体の衝突という問題は、非常にセンセーショナルで脅威的な問題である。それは、単純に“直径が10kmもある岩の塊が頭上に落ちてきたら”と想像すればわかることがある。ちなみに、直径10kmという大きさは、小惑星の世界ではごく普通に存在するものである。1992年12月に地球に接近したトータチスでさえ、差し渡しの長さは6km以上はある。このために、特に一般向けに天体の衝突の問題を扱う場合、いたずらに恐怖感をあおるようになりがちである。確かに、実際に衝突が起これば大変であろうが、大変な事態になるような衝突は、確率的には数十万年に1回程度しか起こらないものであることを忘れてはならない。

さて、数十万年に1回といっても、太陽系の年齢である45億年というタイムスケールで考えれば、話は別である。地球の月をはじめとして、水星から火星までの惑星の表面や火星から海王星までの衛星の表面には数多くのクレーターが発見されている。最近、小惑星ガスプラの写真が探査機ガリレオによって撮影されたが、大きさが20km程度のこの小惑星の表面にも無数にクレーターがあることがわかった。さらに、我々の住むこの地球上にも140個近くのクレーターが確認されている。もちろん、地球上では空気や水による侵食作用や地殻変動などで昔の表面が保存されていない場合が多いので、現在認められるクレーターの数はかなり制限されていると思われる。これらのクレーターの大部分は小惑星や彗星などの小天体の衝突によって形成されたと考えられている。つまり、太陽系の歴史でみれば、天体同士の衝突現象というものは頻繁に起こってきたものなのである。

地球上のクレーターとして有名なものに、アリゾナの隕石孔がある。これは、直径が1.2kmほどのもので、いまから2万5千年ないし5万年前に形成されたものと考えられている。また、カナダのケベックにあるManicouagan クレーターでは、直径が約100kmほどあり、約2億年前に形成されたと推定されている。さらに、変わったものとしては、アルゼンチンにある

Rio Cuarto クレーターがある⁽⁵⁾。これは、過去1万年以内に作られたものと推定されているが、あたかも天体が地表をこすっていったかのような形をしている。地球も、その歴史を振り返れば、いろいろな衝突を受けているのである。

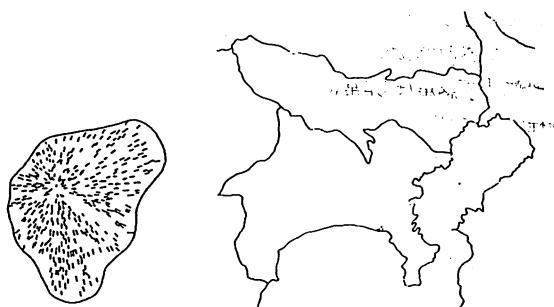
さらに、最近実際に起こった衝突現象と考えられているものに、「ツングースカの大爆発」と呼ばれているものがある。これは、1908年に中央シベリアで起こった爆発で、かなり広い範囲にわたって森林がなぎ倒された。第3図には、被害を受けた領域⁽⁶⁾と東京都・神奈川県の大きさの比較が示されている。幸いにして、爆発が起こった所にはほとんど人は住んでいなかったので的には大きな被害には至らなかったが、85年も過ぎた現在でも、現地には倒れたり焼け焦げたりしている木が多く残っているそうである。

このように、いったん衝突が起これば受ける被害はかなりのものになると思われるが、実際に衝突によって何が起こるのか、現在予想されていることをまとめてみると次のようになる。

- 1) クレーターの形成。（衝突した天体の直径の約20倍の大きさのものが形成される）
- 2) 津波の発生。（高さ数百メートルから数キロメートル）
- 3) 火災の発生。
- 4) 塵や煙によって太陽光線が吸収され寒冷化する。
- 5) 二酸化炭素や水蒸気の発生によって温暖化する。
- 6) 窒素酸化物や硫化水素の発生によって、酸性雨が降ったりオゾン層の破壊が起こる。

このように、局地的被害の他に、地球規模的な環境異変が引き起こされると考えられている。

天体が地球に衝突したときに何が起こるかについては、ある程度想像に頼るしかないので、ここではこれ以上触れないこととし、衝突のエネルギーについてのみまとめ



第3図 ツングースカの大爆発で被害を受けた領域（左）と東京都・神奈川県（右）の面積の比較。ツングースカのデータは参考文献(6)より。

第2表 小惑星が衝突したときに解放されるエネルギー

小惑星の直径 (m)	エネルギー (TNT 爆弾換算 Mton)	備 考
9	0.024	1991年1月18日 ニアミス (1891 BA)
60	20	1908年6月30日 ツングースカの爆発
80	50	1973年8月10日 カナダ・アメリカ上空を通過
150	340	約1万年前 リオ・カルト・クレーター
500	13,000	
1000	100,000	
10000	100,000,000	6500万年前 チクシループ・クレーター
広島型原子爆弾	0.02	
全面核戦争	10,000	「核の冬」の研究で仮定

衝突のエネルギーは、衝突する天体の密度 3 g/cm^3 、衝突の速度を 20 km/s として見積もってある^{(1),(7)}。

ておくこととする。第2表に、小惑星が地球に衝突したときに解放されるエネルギーを示す^{(1),(7)}。この表を見ればわかるように、高々直径が 9 m の小惑星の衝突が、エネルギー的には広島型原子爆弾にも匹敵するのである。また、第3図に示したツングースカ大爆発をもたらした衝突は 60 m の小惑星の衝突に対応し、そのエネルギーは広島原爆の千個分にも相当しているのである。最後に触れるが、このような小さな天体によるニアミスが最近しばしば観測されている。

3. 小惑星の分布

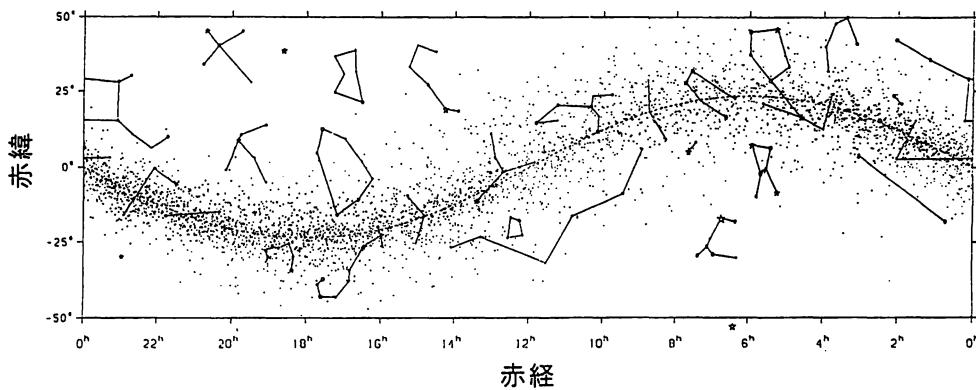
現在、軌道が確定している小惑星の数は 5500 個を越えている。これに、観測はされているが軌道がまだあまり正確には決まっていないものを加えると約 2 万個ほどになる。これらは小惑星全体のほんの一部であると考えられており、まだ発見されていないものも考慮すればその数は莫大なものになろう。このように数は多いのであるが、小惑星は目だたない存在である。現在までに発見されている小惑星の中で最大のものは第1番目の中惑星であるセレスであり、その直径は 1000 km 程度しかない。その他のものはこれよりかなり小さくなる。従って、一般に小惑星は非常に暗く、セレスでも衝の位置で 6.8 等程度の明るさである。望遠鏡を通して見たり、写真にとらない限りには小惑星を確認することはできない。

もし仮に小惑星が明るく輝いていたらどのように見えるのかを、第4図に示してみた。ここでは、4千個ほどの小惑星をプロットしてあるが、このように‘第2の天の川’のようになって見えるはずである。この分布の中央がほぼ黄道面（地球の公転面）に相当する。このように見える理由は、多くの小惑星が火星と木星の間にドーナツ状に分布していることによる。その分布のようすを、第5図に示す。ここでは、約 4,500 個の小惑星の位置を

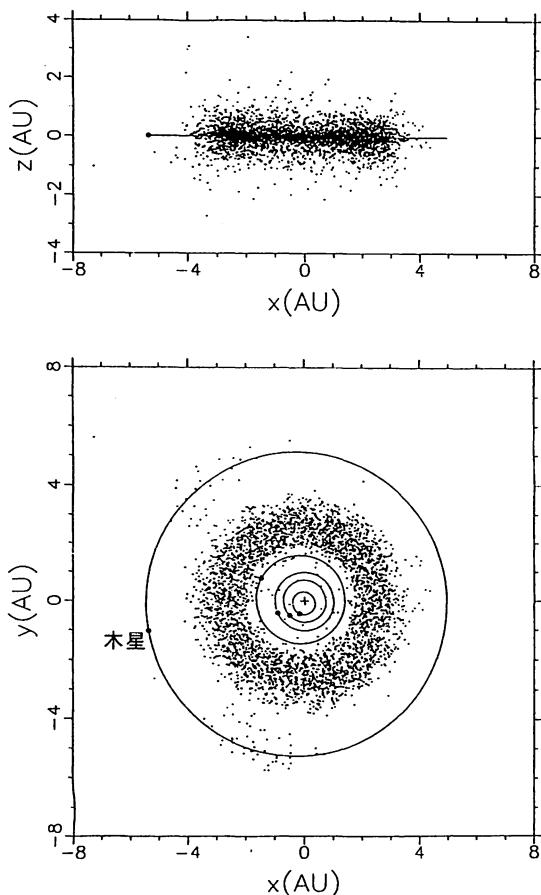
黄道面および黄道に垂直な面に投影した図を描いている。第5図より、確かに多くの小惑星は火星軌道と木星軌道の間に帯状に分布していることがわかる。これを、小惑星帯と呼ぶ。ただし、かなりの‘厚さ’を持って分布しているので、全体的な分布はトーラス状になっている⁽²⁾。また、第5図を見ると、小惑星帯以外にも小惑星が存在していることもわかる。木星軌道付近の木星の前後にあるものがそれである。また、火星軌道の内側にもいくつか存在している。この火星軌道より内側にあるような小惑星が、おもに地球に接近してくるものの候補となっている。

第6図は、特に地球軌道の内側まで入り込むような小惑星だけを取り出して、その軌道を描いたものである。ここでは、37 個の小惑星について軌道が描かれているが、これを見てもかなり軌道が混雑している様子がわかると思う。現在では、ここで描いた数の数倍はこのような小惑星がすでに発見されており、まだ見つかっていないものも相当あると思われるから、地球近傍といえども、かなり軌道は混み合っていることになる。第6図には、黄道面に垂直な方向から眺めた軌道の図も描いてあるが、地球軌道の内側に来るような小惑星については、そのかなりのものが黄道面から遠く離れたところまで達するような特異な軌道をとっていることもわかる。

さて、第4図から第6図までの図は、小惑星の分布の様子を直感的に把握するのにはたいへん便利である。しかし、軌道分布の情報をより定量的に知るために、軌道要素というものを導入する必要がある。軌道要素には 6 つあるが、最も一般的なものは、軌道長半径 (a)、離心率 (e)、軌道傾斜角 (i)、近日点引数 (ω)、昇交点経度 (Ω)、近日点通過の時刻 (T) である。重力で引き合う 2 つの天体の運動を扱う 2 体問題では、運動はケプラー運動となる。特に、小惑星のような



第4図 平成3年3月3日に地球から眺めた小惑星の位置.

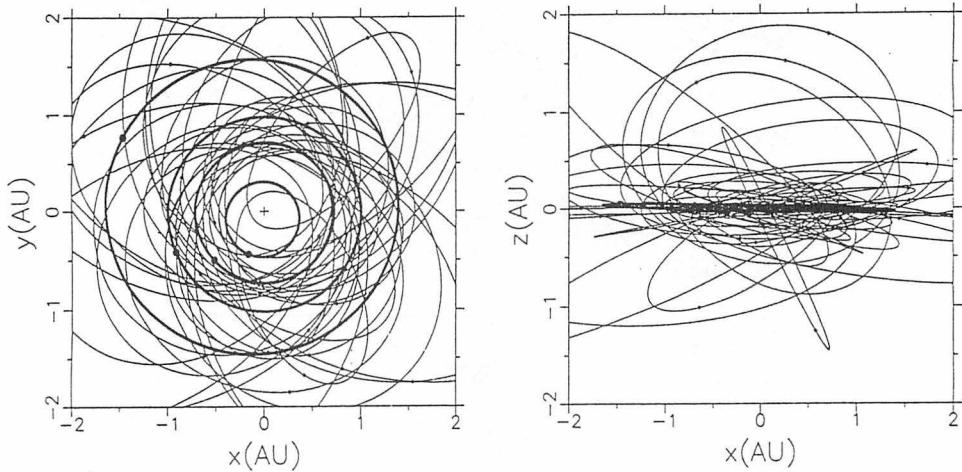


第5図 1993年4月14日の小惑星の分布. 黄道面に投影した図(下)と黄道面に垂直な面に投影した図(上). AUは天文単位.

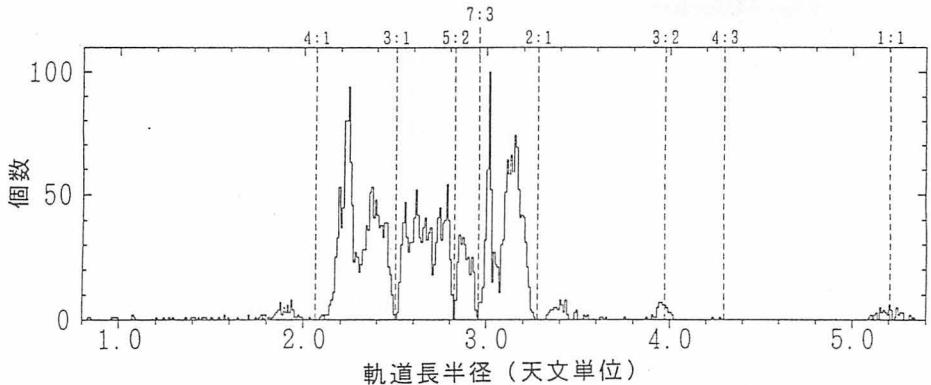
天体の場合には橢円軌道を描くケプラー運動でその運動が近似できる場合が多いが、その橢円の長軸の長さの半分の長さを軌道長半径と呼ぶ。つまり、軌道長半径は軌道の大きさを示すパラメータとなっているのである。また、橢円のつぶれ具合を示すのが離心率であり、真円では離心率は0で、1に近づくほど細長い橢円となる。軌道傾斜角は、基準となる面（普通は黄道面）からの軌道の傾きを示す。さらに、近日点引数・昇交点経度・近日点通過時刻は、軌道の向きや天体の位置を示すためのパラメータとなっているが、ここでは詳細は省略する。

軌道要素を導入したところで、まず小惑星の軌道長半径の分布を見てみよう。第7図のヒストグラムは、小惑星の軌道長半径の分布の様子を示している。この図より、ほとんどの小惑星の軌道長半径は2から3.5天文単位の間にあることがわかる。ここが、小惑星帯に相当する所である。

第7図には木星と小惑星の公転周期の比が簡単な整数比となる場所も示してある。たとえば、3:1というものは、木星が1回太陽の周りを公転するとき小惑星がちょうど3回公転する所を示す。このような関係を公転運動における共鳴（レゾナンス）と呼ぶ。第7図を見て明らかのように、小惑星帯では共鳴が起こるところには小惑星がほとんど存在していない、ギャップとなっている。このギャップのことを発見者の名前にちなんで「カーカウッド・ギャップ」と呼んでいる。ところが、逆に小惑星帯の外側では共鳴が起こるところに数は少ないが小惑星が集まっている。この集まりを「群」といい、それぞれヒルダ群（3:2）、チューレ群（4:3）、トロヤ群（1:1）と呼ばれている。トロヤ群は、第5図に見られた木星軌道付近にある小惑星である。共鳴にあると小惑星の運動は複雑になることが多いのであるが、このこ



第6図 地球軌道の内側にまで入り込む小惑星の軌道(37個). 黄道面に投影した図(左)と黄道面に垂直な面に投影した図(右). 左の図で太い曲線は、内側から水星、金星、地球、火星の軌道を示す.



第7図 小惑星の軌道長半径の分布. 点線は木星と共に鳴が起こる位置を示す.

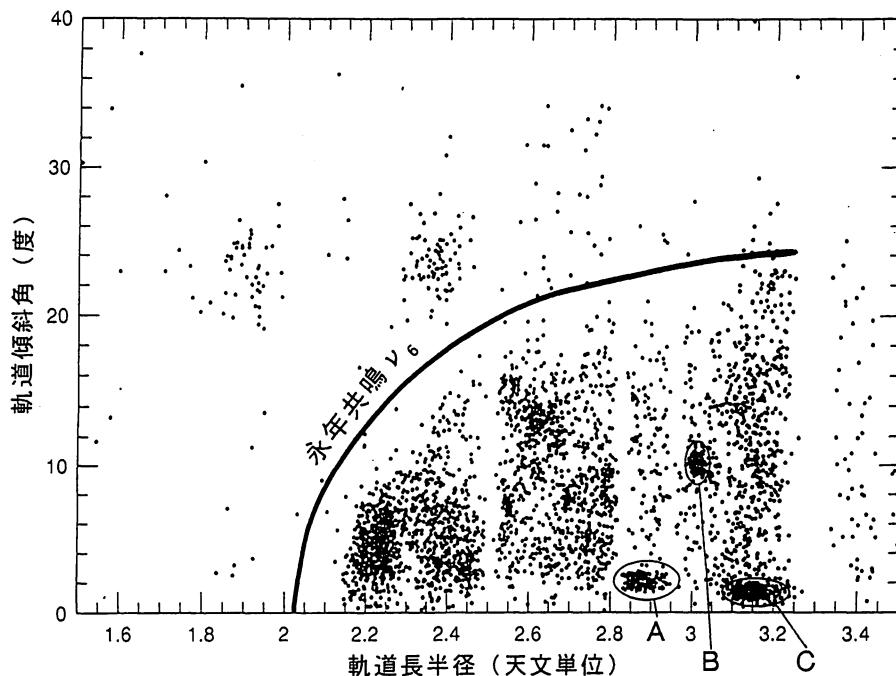
とについては次の章で簡単に触ることにする.

第8図には、小惑星の軌道長半径と軌道傾斜角の分布が示されている. この図も、小惑星の軌道分布の特徴をよく示す図としてしばしば描かれるものである. この図をみると、やはり小惑星の分布にむらがあることがわかる. 曲線で示された部分には小惑星の数が少ないし、また、楕円で囲まれた部分には集中して存在している. 曲線で示された部分は、力学的には「永年共鳴 ν_6 」という特殊な共鳴が起こる領域である. このことについては、また次の章で述べることにする.

第8図に示されている小惑星が集中している部分は、「族」と呼ばれるもので、日本人の天文学者である平山清次によって1918年に発見されたものである. この族

というものは、軌道要素のうち a , e , i の値が非常に似た小惑星の集団である(正確には固有軌道要素と呼ばれるものが似た値になっている)が、このような集団は、第8図にあげたコロニス族・エオス族・テミス族以外にも多く発見されている. 族の起源としては、小惑星同士の衝突によって1つの小惑星が壊れたものであるため、軌道要素でみると集団となっているという説が有力である. 従って、族の存在というものは、小惑星帯で起きたかなり激しい衝突を物語っているのかも知れないものである.

以上見てきたように、集団として小惑星を眺めてみると、様々な特徴があることがわかる. これらの特徴は、何らかの形で太陽系の起源や進化と関係しているはずである.



第8図 小惑星の軌道長半径と軌道傾斜角の分布。曲線は永年共鳴 ν_6 が起こる位置を示す。また、A, B, C はそれぞれコロニス族、エオス族、テミス族を示す。

あり、今後、その解明が期待されているのである。

4. 小天体が地球に到達するメカニズム

前の章でわかったように、地球近傍にも多くの小惑星は存在するが、基本的には小惑星は小惑星帯と呼ばれる火星軌道と木星軌道の間に存在している。では、このような領域にある小惑星は、どのようにして地球に接近したり衝突したりするようになるのであろうか。ここでは、そのメカニズムについて簡単にまとめてみることにしよう。

小惑星や彗星といった小天体が地球に到達するおおよその道筋を模式的に描いたものが第9図である。

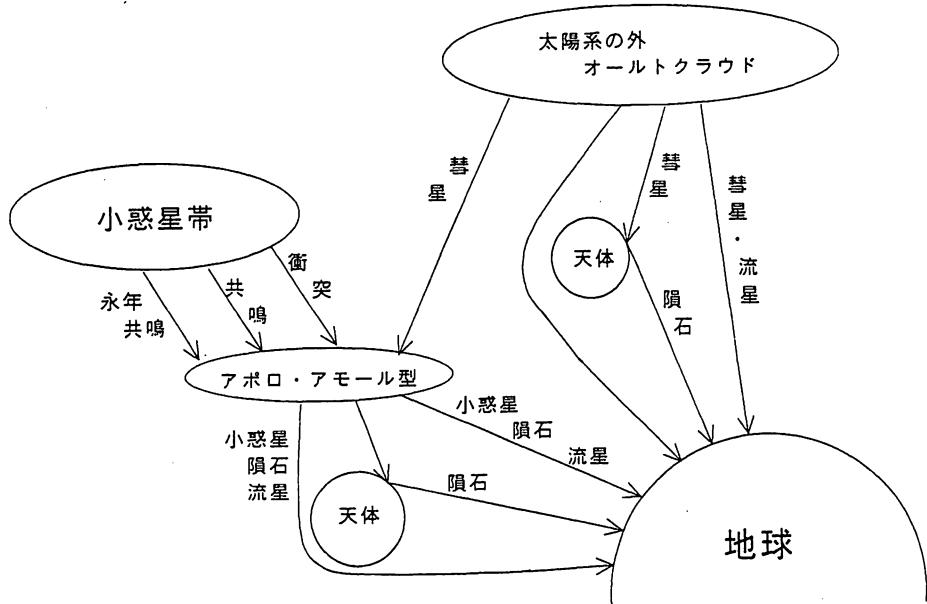
彗星の場合は、太陽系の外（太陽から6万から10万天文単位のところ）にオールトクラウドと呼ばれる彗星の‘巣’があり、そこから彗星が太陽系中心部にやってくるという説がある。または、たとえば銀河系の中に彗星の元になる天体があり、それが太陽系に落ちてくるという説もある。さらに最近では、太陽から千から1万天文単位のところに内部彗星雲がありここを起源としているという説もある。いずれにしても、彗星は太陽系の外から供給されることは確かなようであり、太陽系の中心に運動してきたものが惑星の引力などで捕らえられ、短周期彗星になると考えられる。従って、彗星は比較的不

安定な軌道にある場合が多く⁽⁸⁾、惑星に接近したり衝突する可能性が高い。

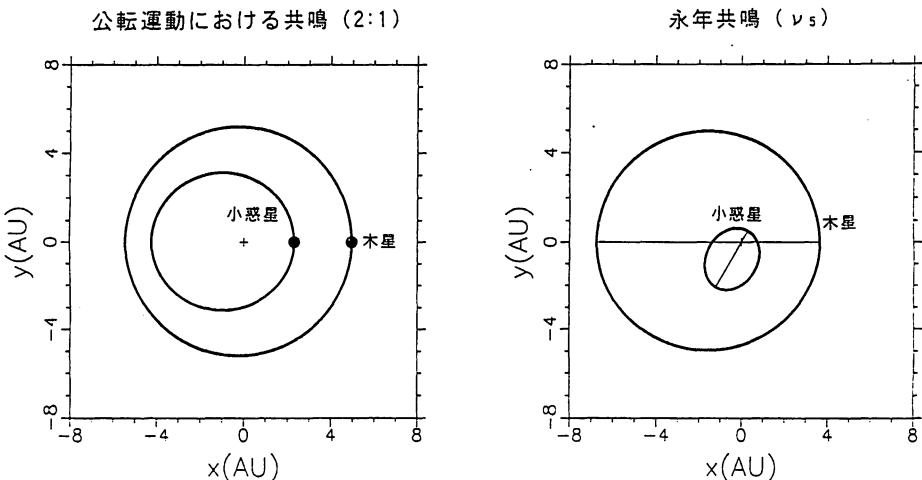
一方、小惑星の場合には、もし最初から小惑星帯にあれば地球などの内側の惑星軌道まで小惑星が来ることはない。ただし、‘ある特別なこと’が起こればその可能性が生じてくる。ある特別なことは、共鳴と衝突である。これらの現象により、小惑星帯にあった小惑星が、‘アポロ・アモール型’と呼ばれる小惑星になる。このアポロ・アモール型小惑星とは、地球軌道と交差したり地球に近づいたりするような小惑星のことを指す（正確な定義はここでは省略する）。このような小惑星になれば、地球と衝突する可能性がでてくるのである。アポロ・アモール型小惑星の中には、彗星起源のものもあると考えられている。

小惑星帯にある小惑星がアポロ・アモール型小惑星になるためには、2つのメカニズムが考えられる。1つは、小惑星同士の衝突や火星などの引力の影響で軌道が変化することによる場合であり、もう1つは3章で述べた共鳴現象というものによる場合である⁽⁹⁾。共鳴には、第7図で見た公転運動における共鳴と、第8図で見た永年共鳴とがある。第10図を用いて、これらの共鳴を簡単に説明してみることにする。

まず、公転運動における共鳴であるが、第10図（左）



第9図 地球に小天体が到達する道筋.



第10図 公転運動における共鳴と永年共鳴.

に示されている $2:1$ の共鳴といふものは、木星が 1 回太陽の周りを回るとき小惑星がちょうど 2 回公転するような運動のことである。この場合は図からもわかるように、小惑星はいつも同じ所で木星を追い越すことになる。従って、同じような力を周期的に受けることになるが、そのことによって軌道が大きく変化する場合が生じる。複雑な場合としては、たとえば $7:3$ という共鳴があるが、これは木星が 3 周する間に小惑星が 7 周するものである。この場合も、基本的には同じ場所（複数）で小惑

星は木星を追い越すことになる。

永年共鳴は、軌道そのものの動きに關係して起こる共鳴である。第10図（右）には、特に ν_5 と呼ばれる永年共鳴の模式図を示す。この図では、分かりやすいように誇張して描いてあるが、木星の軌道は完全な円ではなくてやはり橢円形をしている。また、小惑星の軌道も一般に橢円形である。これらの軌道は、惑星による攝動によって空間に対して動いている。つまり、橢円の向きが徐々に変化している（近日点の移動が起こっている）のであ

る。一般には、その向きの変化の仕方はまちまちなのであるが、場合によってはほとんど同じ角速度で向きの変化が起こる場合がある。ここで、木星と小惑星の近日点の移動の仕方が一致した場合を、永年共鳴 ν_6 と呼ぶ。また、第8図には永年共鳴 ν_6 というものが示してあるが、これは土星の近日点の動きと小惑星の近日点の動きが一致する共鳴である。(永年共鳴にはこの他に、昇交点Ωの動きに関係するものがある。)

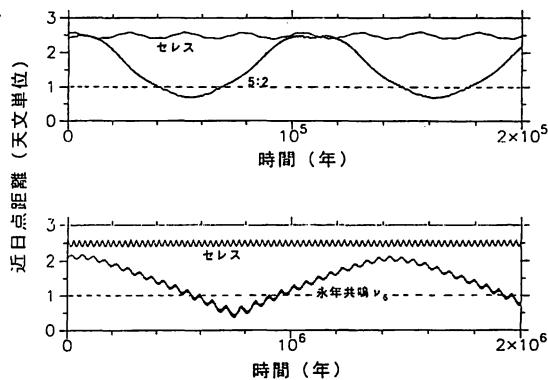
このような公転運動における共鳴や永年共鳴にあると小惑星の軌道進化は特異なものとなる。共鳴にある小惑星の運動については、今までに様々な解析がなされている。その結果、共鳴にあると小惑星の運動が非常に複雑になることがわかつた。場合によっては、小惑星の運動がカオスになる。このことは、一般の共鳴現象と共通である。ここでは、共鳴にある小惑星の運動の詳細については省略することとし、最も著しい特徴のみを述べることにする。

その特徴とは、共鳴にあると小惑星の軌道が非常に大きく変化する場合があるということである。その様子を数値計算の結果で示すと、第11図のようになる。この図は、小惑星の近日点距離(軌道上で太陽に最も近い点の太陽からの距離)の変化の様子を示したものである。比較のために、共鳴状態にはない小惑星であるセレスの軌道変化も示してある。

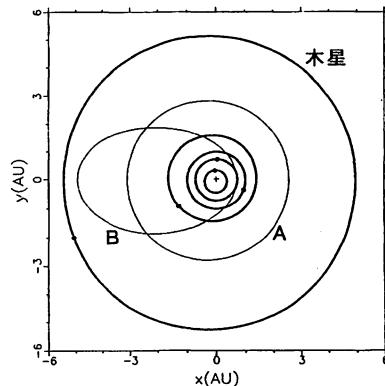
まず、公転運動における共鳴であるが、第11図(上)では5:2共鳴の場合の結果が示されている。ここでは、計算はこの共鳴の特徴を引き出す最も単純な系である制限3体問題で行った。つまり、太陽・木星・小惑星の3天体を考えるが、小惑星は他の2天体には重力的影響を与えないとして軌道計算をするのである。この図で明らかのように、5:2共鳴にあると小惑星の近日点距離が大きく変化する。時刻によっては、近日点距離が1天文単位より小さくなっているが、このときは小惑星は地球軌道よりも内側まで入り込んでいることになる。つまり、この時には地球と衝突する可能性が生じているのである。この大きな軌道の変化は、約10万年のタイムスケールで起こっている⁽¹⁰⁻¹³⁾。

永年共鳴 ν_6 の場合も同様に近日点距離が大きく変化する。第11図(下)に数値計算による結果を示す。この場合の計算では、永年共鳴の特徴を引き出すために、太陽・木星・土星・小惑星という4天体を考慮して計算を進めている。ただし、ここでも小惑星は他の天体に影響を与えないとしている。この永年共鳴の場合は、約百万年というタイムスケールで軌道が変化しているが、やはり地球軌道の内側まで来ることがわかる⁽¹⁴⁾。

このように、これらの共鳴状態にあると軌道が大きく



第11図 共鳴にある小惑星の近日点距離の変化。近日点距離が1天文単位より小さい部分では、地球と衝突する可能性がある。比較のために、セレスの近日点距離の変化も示す。



第12図 5:2共鳴にある場合の軌道の大きな変化。Aの軌道からBの軌道まで変化する。

変化するのであるが、その様子を直感的に分かりやすく示したものが、第12図である。この図は、第11図(上)で示した5:2共鳴の計算結果に基づくものであるが、初期の軌道(A)と最も近日点が内側に入り込んだときの軌道(B)とを描いている。この場合は、軌道が変形することにより、内側の惑星のうち火星から金星までの軌道と交差するまでになっているようすがわかる。従って、もともとは火星軌道のはるか外側の小惑星帯中にあったとしても、時間が経つと内側の惑星と衝突する可能性がでてくることになるのである。同様なことが、第7図で示した4:1, 3:1, 7:3, 2:1の共鳴や、第8図で示した永年共鳴 ν_6 でも起こっている。なお、第12図で一度(B)のようになった軌道は再び(A)に戻る。つまり、軌道の形は(A)と(B)の間で周期的に

に変化し続けるのである。ただし、上でも述べたように共鳴における小惑星の運動は複雑であり、同じ共鳴にあっても条件の微妙な違いによって軌道化は大きく異なる。

以上の事実をふまえてもう一度第7図および第8図の軌道要素の分布図を眺めてみると、小惑星帯の進化について次のようなシナリオが考えられる。

- 1) 以前は、現在ギャップとなっているところにも小惑星が存在していた。〔理由：小惑星帯が形成されたときは小惑星の分布は現在の分布よりは一様であったと仮定するのが自然である。また、衝突などの過程を通して、ギャップ中に小惑星が入る可能性もある。〕
- 2) 現在ギャップとなっているような共鳴があると、その軌道は第11図・第12図で見たように数万年から百万年程度のタイムスケールで大きく変化する。
- 3) 小惑星の軌道が変化して惑星の軌道と交差するようになったとき接近・衝突の可能性が生じるが、長時間の間には惑星に衝突して小惑星が消滅したり、接近して軌道が大きく変化させられたりする。
- 4) 従って、このように軌道が大きく変化し得る共鳴からは小惑星が取り除かれることになり、現在はギャップとして観測される。

公転運動における共鳴において最初にこのようなシナリオを提案したのは J. Wisdom⁽¹⁵⁾ である。このように考えると、小惑星帯のギャップの存在は地球などに接近したり衝突した小惑星の存在を間接的に示していることになる。実際、地球に落ちた隕石にはこのような共鳴起源のものもあると言われている。

5. 小惑星のニアミス現象の解析

それでは、現在観測されている小惑星は地球にどのくらい接近するのであろうか。また、地球に衝突する可能性はあるのであろうか。ここでは、スーパーコンピュータを用いた数値計算で小惑星の接近現象を解析してみたのでその結果について紹介する^{(1-4),(16),(17)}

3章でも述べたように、現在では 5500 個余りの小惑星の軌道が正確に決定されているが、このうちの 4506 個 (No.1 から No.4508 まで, No.719 と No.878 は除く) についてニアミスをモニターしながらその軌道運動を計算した。小惑星の軌道運動の計算には、太陽や 9 個の惑星の引力以外に、小惑星同士の重力相互作用も考慮している。数値積分はカウエル法を用い、0.2 日間隔で 1990 年 11 月から 2122 年 4 月までのおよそ 130 年間にわたって行った。

この計算では、小惑星と惑星のニアミスに加えて小惑星同士のニアミスも調べている。さらに、小惑星帯探査のための資料を得るために、小惑星帯に 14 機の人工天

体を置いてその運動とニアミスも調べている。この計算で得られたニアミスデータの数を第3表に示す。ここでは、小惑星同士や小惑星と人工天体の場合には 0.01 天文単位以内、小惑星と内側の惑星では 0.2 天文単位、小惑星と外側の惑星については 1 天文単位以内に接近した場合をニアミスとしてデータを取得した。以下では、特に小惑星と地球とのニアミスについての結果に注目することにする。

小惑星と地球とのニアミスは計算した期間に 307 回起こっているが、そのすべてを図に示すと第13図のようになる。この図では、地球と小惑星の接近範囲と最接近したときの相対速度が示されている。なお、同じ小惑星が何度も接近している場合もあるので、地球に接近した

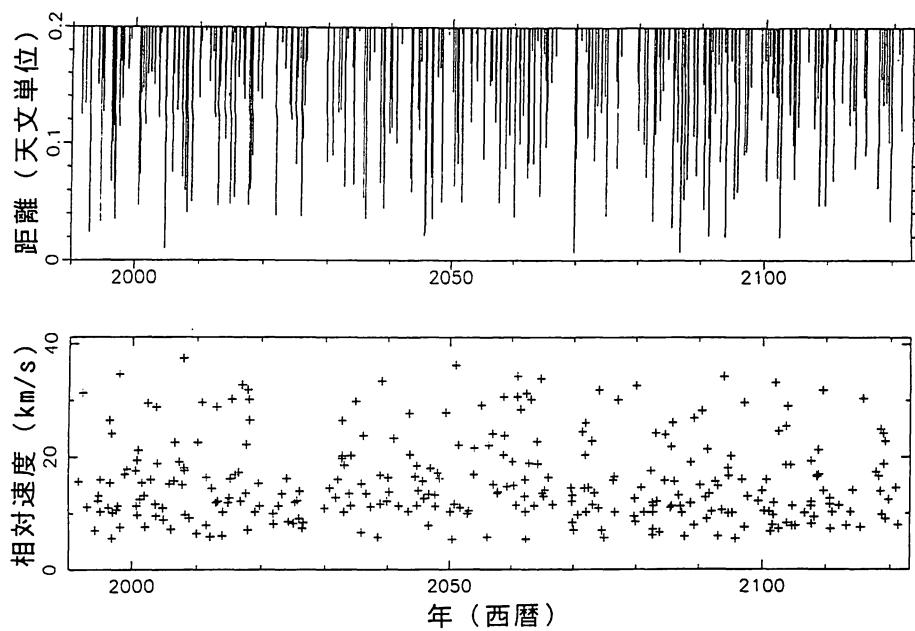
第3表 ニアミスのデータベース

ニアミスを起こす天体	回数	ニアミスの定義
小惑星一小惑星	11,903	0.01 AU 以内の接近
小惑星一水星	220	0.2 AU 以内の接近
小惑星一金星	269	"
小惑星一地球	307	"
小惑星一火星	223	"
小惑星一木星	1	1.0 AU 以内の接近
小惑星一人工天体	86	0.01 AU 以内の接近
人工天体一人工天体	1	"
合計	13,010	

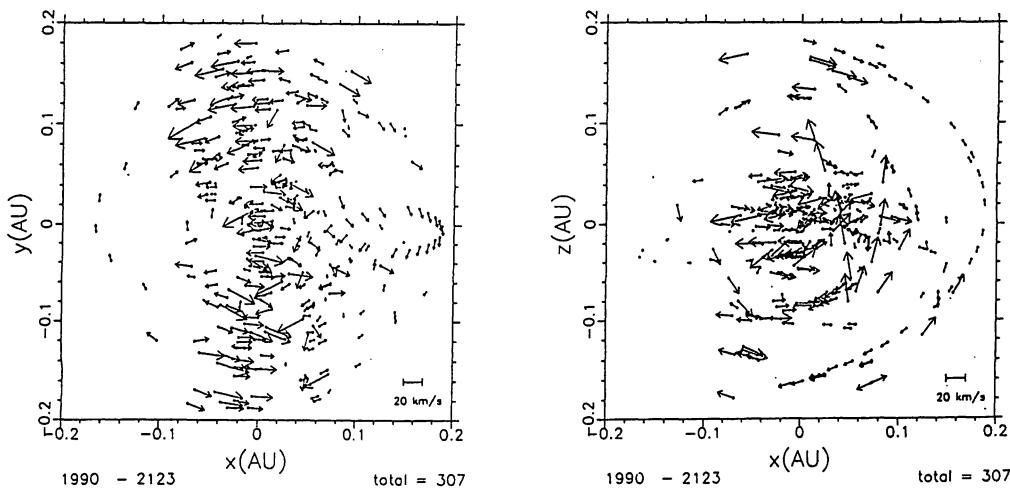
4506個の小惑星が1990年11月5日から2122年4月7日の間に起こすニアミスの数を示す。(人工天体は14機)

第4表 地球と小惑星のニアミス

小惑星の番号	年・月・日	接近距離 (AU)	相対速度 (km/s)
<2000年までに起こる0.1 AU 以内のニアミス：時刻順>			
4179	1992-12-8.2	0.0241	11.17
1620	1994-8-25.4	0.0333	12.22
2063	1996-3-31.6	0.0677	11.06
4197	1996-10-25.6	0.0845	24.16
3908	1996-10-27.8	0.0612	5.68
4179	1996-11-30.0	0.0354	10.18
4486	2000-8-14.4	0.0465	17.57
4179	2000-10-31.2	0.0738	9.71
<今後130年間に起こるニアミス：距離の小さい順>			
2340	2069-10-21.4	0.0066	13.19
2340	2086-10-21.6	0.0070	13.16
4179	2004-9-29.6	0.0104	10.99
2101	2102-7-10.0	0.0195	24.57
3200	2093-12-14.4	0.0198	34.22
4179	2069-11-5.6	0.0199	8.40
3362	2045-8-22.0	0.0210	15.70
3361	2091-4-19.0	0.0211	9.09
2340	2045-10-21.4	0.0242	12.59
4179	1992-12-8.2	0.0242	11.18



第13図 小惑星と地球のニアミス、小惑星と地球との接近範囲（上）とニアミス時の相対速度（下）を示す。上の図では、縦線が0の近くまでびているほど距離の近いニアミスを示している。



第14図 地球のまわりのニアミスの様子。ニアミスが起った位置と相対速度を黄道面（左）および黄道面に垂直な面（右）に投影した図。中心に地球があり、太陽はx軸負の方向にある。

小惑星の数にすると 51 個である。これらのニアミスの中から、西暦 2000 年までに起こる 0.1 天文単位以内のニアミスと、計算した全期間での接近距離の小さいニアミスを第 4 表に示す。これらの図や表を見る限り、近い将来に地球に小惑星が衝突する可能性はないようである。もちろん、このことはここで解析した 4506 個の小惑星についてしか成り立たないが、少なくとも現在発見されているような比較的大きな小惑星の衝突はすぐには起こらないと言ってよい。ちなみに、1992 年のトータチス (4179) の接近も第 4 表の距離の小さいニアミスに含まれており、軌道がわかっている小惑星のニアミスとしては距離が小さかったということがわかる。

第 14 図には、地球を中心にしてニアミスが起こった位置と相対速度が描かれている。ここでは、ニアミスの範囲を 0.2 天文単位以内というように比較的大きくとっているせいもあるのだが、この図を見ると地球もかなりニアミスを受けていることが実感できる。この図の中に、系統的なパターンが見られるところがあるが、これは同じ小惑星が連続してニアミスを起こしていることによるものである。

ここで得られたデータをもとにして、小惑星の地球衝突の確率を求めることができる。その結果、衝突確率はおよそ 40 万年に 1 回程度という値になった。この値は、130 年間という非常に短い期間の解析から求められたものではあるが、現在までに得られている確率より少し小さいがほぼ同じ値になっている。実際には、ここでの計算には入っていないが地球のそばには小惑星がより多くあるから、それらも考慮した計算を行うと衝突確率はより大きくなることと思われる。

6. まとめと今後の課題

ここでは、小惑星の分布や軌道進化そして地球へのニアミスという観点から天体の衝突という問題を考えた。以上で述べてきたことおよび今後の課題をまとめるところとなる。

- 1) 天体の地球への衝突という現象は常に起こっていることである。ただし、天体の大きさが大きくなると衝突頻度は小さくなる。
- 2) 小惑星はある特徴を持った分布をしており、その特徴は力学的な性質と密接に関係している。
- 3) 共鳴のような力学的に特別な状態にあると小惑星の軌道変化が大きくなる場合があり、小惑星帯から地球のなどの内側の惑星へと物質を輸送することができる。
- 4) 現在までに得られているデータに基づく限り、近い未来にある程度大きな小惑星が地球に衝突する可能性はほとんどない。

5) ただし、地球への小惑星の衝突は想像以上に起こっており、我々としては太陽系内小天体を把握していく観測を行ったり、より多くの天体の精密な軌道解析を行っていく必要がある。

6) さらに、今後は小惑星の探査や、衝突を回避する方法の検討、そして地球という複雑なシステムを理解していくことなどが重要である。

特に(5)については、5 章で示した計算結果以外に第 5 表に示してあるような観測データがある。この表は最近地球に接近したことが確認された小惑星の一覧表である。ここでは、トータチス以外は小惑星の名前が仮符号になっている。つまり、これらについてはまだ軌道が正確には決められていないのであるが、これはこれら的小惑星が地球に近づいたために発見されたものであり、まだ十分なデータが得られていないことによる。大きさとしては、トータチスを除くと、5 m 程度の小さなものから 1 km 弱のものまである。5 m 程度ならば、地球と衝突しても問題ないであろうが、数百メートルとなるとかなりの被害が予想される。そのことは、第 3 図で示したツングースカ大爆発や第 2 表のエネルギーからも想像される。第 5 表に示したものは、たまたま観測にかかったものである。我々の知らないうちに、より多くのニアミスが実際には起こっているものと思われる。

小惑星という小さな天体は非常に多く存在しているのにもかかわらず、我々はまだそのほんの一部だけを認識しているにすぎない。科学技術という手段を持った我々は、天体の衝突といっていたずらに騒ぐのではなく、地球の周りの‘天体環境’というものをきちんと把握することを進めていく必要があろう。

第 5 表 最近地球に接近した小惑星

小惑星の名前	年・月・日	接 近 距 離		推定直径 (m)
		(AU)	万km	
1986 J K	1986- 5-29	0.018	269	
1988 T A	1988- 9-30	0.009	135	
1989 F C	1989- 3-23	0.005	75	100
1990 H A	1990- 4- 6	0.031	460	900
1991 B A	1991- 1-18	0.0011	17	5
1991 T T	1991-10- 7	0.031	460	
1991 T U	1991-10- 8	0.0049	73	5
1991 V G	1991-12- 5	0.0031	46	5
1992 U Y4	1992- 9- 7	0.031	460	
トータチス	1992-12- 8	0.023	350	4000+2500
1993 K A	1993- 5-18	0.0071	106	40
1993 K A2	1993- 5-21	0.0010	15	10

トータチス以外の直径は、小惑星のタイプを C として明るさより推定した。また、トータチスは、2 つの塊がくついたような形状をしている。(このデータは、元国立天文台の香西洋樹氏による。)

謝 辞

この報告で、小惑星のニアミスの解析（5章）に関する計算は、リクルートスーパーコンピュータ研究所のスーパーコンピュータ SX2A を用いて行った。この計算にあたり協力していただいたリクルートスーパーコンピュータ研究所のラウル・メンデス氏とショーン・ローレン氏に感謝する。なお、このニアミス解析の部分は、国立天文台の中村士氏との共同研究である。

参考文献

- (1) 地球衝突小惑星研究会（古宇田, 輿石, 松島, 吉川, 磯部, 中村, 藤原, 水谷）, いつ起こる小惑星大衝突, 講談社, 1993年。
- (2) 吉川, “小惑星の分布と運動”, 日経サイエンス, 22, pp.14-21, Oct. 1992.
- (3) 吉川, “太陽系内微小天体による衝突”, 数理科学, 31, pp.36-42, June 1993.
- (4) 中村, 吉川, “地球に接近する小天体”, 岩波科学, 63, pp.358-365, June 1993.
- (5) P. H. Schultz and J. Kelly Beatty, “Tear-drops on the Pampas”, Sky & Telescope, pp. 387-392, Apr. 1992.
- (6) D. Morrison, “The Spaceguard Survey”, Report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop, January 25, 1992.
- (7) 輿石, “地球直撃の可能性と影響”, 日経サイエンス, 22, pp.22-27, Oct. 1992.
- (8) T. Nakamura and M. Yoshikawa, “COSMO-DICE : Dynamical Investigation of Cometary Evolution”, Publication of the National Astronomical Observatory of Japan, 2, pp. 293-383, 1991.
- (9) 吉川, “星の王子さまの来た道 一小惑星軌道の大きな変化”, 天文月報, 22, pp.280-285, Nov. 1989.
- (10) M. Yoshikawa, “A survey of the motions of asteroids in the commensurabilities with Jupiter”, Astron. Astrophys., 213, pp.436-458, 1989.
- (11) M. Yoshikawa, “Motions of Asteroids at the Kirkwood Gaps I. On the 3:1 Resonance with Jupiter”, Icarus, 87, pp.78-102, 1990.
- (12) M. Yoshikawa, “Motions of Asteroids at the Kirkwood Gaps II. On the 5:2, 7:3, and 2:1 Resonances with Jupiter”, Icarus, 92, pp.94-117, 1991.
- (13) M. Yoshikawa, “Numerical Investigation of Motions of Resonant Asteroids in the Three-Dimensional Space”, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 54, pp.287-290, 1992.
- (14) M. Yoshikawa, “A Simple Analytical Model for the Secular Resonance ν_6 in the Asteroidal Belt”, Celestial Mechanics, 40, pp.233-272, 1987.
- (15) J. Wisdom, “The origin of the Kirkwood gaps: A mapping for asteroidal motion near the 3/1 commensurability”, Astron.J., 87, pp. 577-593, 1982.
- (16) 吉川, “小惑星のニアミス現象”, 天文月報, 86, pp.73-74, Feb. 1993.
- (17) M. Yoshikawa and T. Nakamura, “Near-miss in Orbital Motion of Asteroids”, submitted to Icarus.