

## イトカワの地球衝突確率計算

吉川 真<sup>1)</sup>, Patrick Michel<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>JAXA, <sup>2)</sup>Observatoire de la Cote d'Azur

### Probability Calculation of Earth Collision of Itokawa

Makoto YOSHIKAWA<sup>1)</sup>, Patrick Michel<sup>2)</sup>

#### Abstract

Asteroid (25143) Itokawa was explored by Hayabusa spacecraft in 2005. Hayabusa is the first asteroid sample return mission in the world. At present (June 2008), Hayabusa is still on going back to the earth. So we do not know whether the surface materials of Itokawa were taken or not, but at least it was successful for Hayabusa to study Itokawa by remote sensing technique. Now we know a lot of things about this strange little world. In order to know the orbital evolution of Itokawa, we analyzed the orbit of Itokawa. At first we study the current orbit of Itokawa and found that it has a very chaotic orbit. This means that usual methods of orbital calculation are not appropriate to know the orbital evolution of Itokawa. Therefore we used some statistical methods. The result shows that the Itokawa maybe came from the inter part of the main asteroid belt, and it is very probable for Itokawa to collide with Earth or inner planets or the sun. This is the typical evolution of Near Earth Objects (NEO). The probability of collision to the earth is about once in one million years. Itokawa is important to study not only for the planetary science but also for spaceguard because it is one of the candidate asteroids that will collide to the earth.

Key Words: Collision probability, Itokawa, Hayabusa mission

#### 1 はじめに

本研究を行うきっかけとなったのは、日本の小惑星探査ミッション「はやぶさ」である。「はやぶさ」は、小惑星からその表面の物質を採集して地球に持ち帰るという世界初の小惑星サンプルリターンミッションであるが、その探査対象となった小惑星が確定番号25143が付いた小惑星イトカワである。

「はやぶさ」は、2003年5月に打ち上げられてから2年4ヶ月ほどかかかって、2005年9月に小惑星イトカワに到着した。到着したときには、イトカワの全く予想していなかった姿に、関係者だけでなく一般の人々も驚ろかされた。小惑星と言えばクレーターで覆われていると思っていた既成概念が、一気に吹き飛んでしまったのである(図1)。「はやぶさ」は、2ヶ月間ほどイトカワを観測した後、イトカワへの接近やタッチダウンを試みた。タッチダウンにおいては、想定外のことも起こった。特に2回目のタッチダウンの後で燃料漏れが起こってしまい、一時は通信もできない状況となった。探査機はその後復活したが、地球への帰還が3年延びて2010年6月の予定となった。

「はやぶさ」の目的は、小天体を探査しその表面物質を地球に持ち帰るための技術を確立することであるが、サイエンスとしては、始原的な天体である小惑星を調べることで、太陽系の誕生の謎を探ることである。

まだミッションが完結していないが、これらの目的はこれまでの運用やリモートセンシングでの観測でかなり達成されている。特に、大きさがたった500m程度しかない天体が初めて詳細に観測され、その素性が初めて明らかにされたことが重要である。このことは、惑星科学としても大きな進展をもたらすものになったのである。

それと同時に、イトカワは地球接近天体(NEO: Near Earth Objects)でもある。NEOの探査はイトカワが初

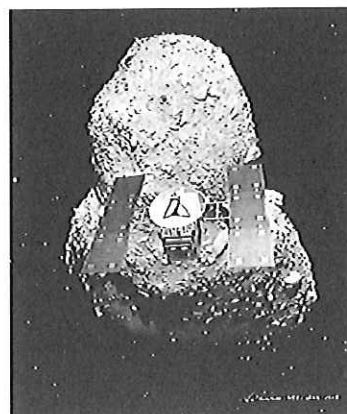


図1 「はやぶさ」探査機と小惑星イトカワ  
イトカワの実際の写真との合成(池下章裕氏による)

めてではなく、すでにアメリカのニア・シューメイカー探査機により小惑星エロスが探査されている。エロスは、最初に発見された地球接近小惑星である。しかし、エロスのように差し渡しが40km近くあるような天体が地球に衝突する確率は非常に低い。人類としてはそのような天体の衝突を想定しなくてよい。ところが、イトカワ程度の天体の衝突になると、確率は低いが現実性を帯びてくる。つまり、「はやぶさ」の探査は、地球に衝突しうる天体への世界初の探査と言ってもよいのである。

ここでは、このイトカワの軌道進化を調べることで、地球への衝突の可能性を明らかにした。その結果について以下にまとめる。

## 2 小惑星イトカワ

小惑星イトカワは、1998年9月26日にアメリカのLINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) プロジェクトによって発見された。近日点距離が0.95天文単位、遠日点が1.70天文単位であり、地球軌道の内側から火星軌道の外側まで達する軌道を持っている。すでに述べたように典型定なNEOであり、NEOとしてはアポロ型小惑星に分類されている。

発見された当初は、1998 SF36という仮符号で呼ばれていたが、特に「はやぶさ」の探査対象天体となつてからは観測が積極的に行われるようになった。そのために、軌道が正確に決定され、2001年6月には25143という確定番号が付与された。

確定番号が付くと小惑星に名前を付けることができるようになるが、名前を提案できるのは、その小惑星の発見者である。LINEARプロジェクトに対して旧宇宙科学研究所(現宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)よりイトカワ (Itokawa) という名前を提案して欲しいと申し入れたところ快く了承され、2003年8月には1998 SF36という小惑星にイトカワという名前が付けられた。「イトカワ」の名前の由来は、日本のロケットの生みの親である、故糸川英夫博士にちなみだものである。日本最初のロケットであるベンシルロケットの発射実験が行われたのが、今からちょうど50年前の1955年だった。

小惑星イトカワについては、地上からの観測でいろいろな情報が得られていた。地上からの観測で分かっていたことは

- ・形状：長軸が約600m、短軸が300mほどの細長い形
- ・自転：周期が約12時間で、自転軸はほぼ黄道面に垂直。逆行。
- ・スペクトルタイプ：Sタイプ (ケイ酸塩鉱物を多く含む)

などである。イトカワの形状については、地上からの

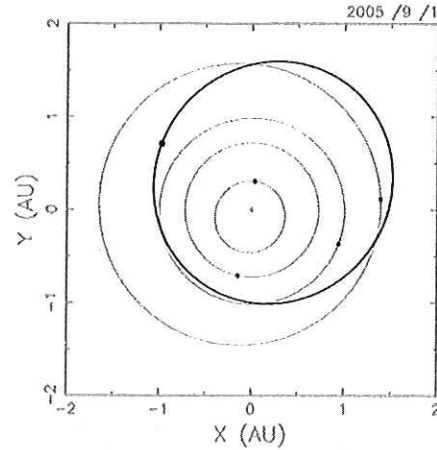


図2 小惑星イトカワの軌道

中心が太陽で、水星から火星の軌道が描いてある。  
(黄道面に投影)

光学望遠鏡による変光観測や、イトカワが地球に接近した時(2001年3月および2004年6月には、それぞれ0.04および0.01天文単位まで接近)のレーダーによる観測で推定された。

「はやぶさ」がイトカワに接近して探査したことにより、これらの情報が確認されただけでなく、非常に詳細にイトカワの特徴を知ることができた。その詳細については、別に譲ることにして、1点のみここで触れておくとする。イトカワの密度が $1.9\text{g/cm}^3$ と普通コンドライトなどと比べて非常に小さいことである。このことで、イトカワ内部の空隙率が40%と予想され、イトカワが「がれき」の集まりではないかと推定された。後で述べるように、イトカワは小惑星帯の内側から現在の軌道に移ってきた可能性が高いが、小惑星帯で形成されてその後軌道が変化した可能性が高いことになる。

## 3 イトカワの軌道と軌道進化

### 3.1 イトカワの現在の軌道

小惑星イトカワの軌道は、現在、図2のように、地球軌道と火星軌道の両方と交差するようなものとなっている。また、イトカワの軌道面は、黄道面(地球の軌道面)とほぼ一致している。つまり、見かけだけでなく、実際に地球や火星に接近する軌道となっているのである。前節で述べたように、2004年6月には地球に0.01天文単位(約150万km)まで接近している。

このように、惑星に接近しやすい軌道の場合、その軌道進化がカオスになりやすい。カオスとは、初期条件の微小な違いが、時間が経つと急速に拡大されてしまう状況のことである。どのような天体でも決定された軌道には誤差があるのだが、軌道進化がカオスになっていると、その誤差のために将来の軌道が予測でき

なくなるのである。まさに、小惑星イトカワがそのような状態にある。

3.2 カオスのときの計算方法

天体の軌道運動を調べる場合、通常はコンピュータで計算をすればよい。ところが、運動がカオスの状態にある場合には、単純に計算しただけでは軌道を正しく求めたことにはならない。コンピュータで計算をすれば、確かに1つの“答え”は出るのであるが、それが正しいという保証が無いのである。

このような場合には、似た軌道にある多数の天体について軌道計算を行い、統計的に性質を見るということを行う。たとえば、本来のイトカワの軌道が“nominal (ノミナル)”だとすると、その周りに微量量だけずらした多数の“clone (クローン)”をつくり、それらすべてについて軌道計算を行うのである(図3)。その上で、どのような傾向にあるのかを調べることになる。イトカワについての本研究も基本的には、このような手法で行った。

3.3 イトカワの将来

ここでは、小惑星イトカワについて、本来の軌道とそのクローンを合わせて39個設定し(ここでは、これを“イトカワ・クローン”と呼ぶことにする)、その“運命”が決着するまで計算を行ってみた。ただし、計算期間は1億年間までとした。軌道がばらついていく様子を図4に示す。また、最終状態の結果をまとめると表1のようになる。

つまり、39個のイトカワ・クローンに対して、太陽と衝突するものが14個(約36%)、内側の惑星(水星、金星、地球)と衝突するものが19個(約49%)となり、合わせると85%が1億年以内に太陽系の内側で衝突によってその“運命”を終わるということになる。残りは、木星に衝突するか、土星に遠く飛ばされてしまうものがわずかなり、1億年以上にわたって太陽系の内側の領域で生き残っていたものが4個(約10%)である。

ここで計算した個数が39個であり、正確な確率を論じるには数が少ないのであるが、イトカワの運命として最もありそうなものが太陽や内側の惑星との衝突であると結論づけて問題ないであろう。この節の最後に、もう少し詳しい衝突確率の計算結果を示す。

ここでいくつかのケースについて、軌道の変遷を示してみよう。図5には、地球に衝突するケースとして最短時間の場合と最長時間の場合が示されている。短期間のうちに衝突してしまう方は軌道の変化が少ないが、長期間かかって衝突する方はかなり多彩な軌道を経ていることがわかる。同様に、太陽・水星・金星に

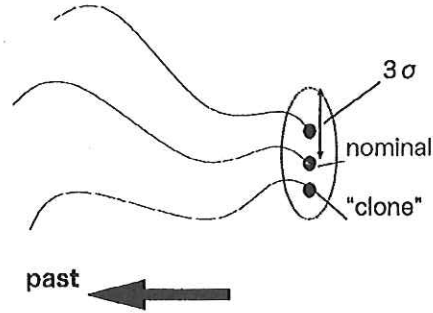


図3 “クローン”天体による計算

nominal が本来の天体の軌道であるとする、その周り(誤差範囲内)に多数の架空の天体を配置し、これら全体の軌道進化を調べる。

衝突する場合についても、軌道の変遷のようすが示されている。

ここで示した軌道の変遷を見ればわかるように、イトカワが天体に衝突する場合でもさまざまな軌道の変化があることがわかる。これが、カオスを端的に示していると言える。(軌道進化においては、各種の共鳴や天体との接近が起こっている。)

3.4 イトカワの惑星への衝突確率

ここでの計算は、39個のイトカワ・クローンについてのものであるが、すでに述べたように39個という数は、どの天体にどのくらい衝突するのかの確率を論ずるには少なすぎる。つまり、39個のイトカワ・クローンの“運命”を見ただけでは、イトカワの“運命”は正確には分からないのである。

そこで、39個のイトカワ・クローンの軌道進化のそれぞれについて、瞬間々々の軌道に対する惑星への衝突確率を計算して、その平均をとるような解析を行ってみた。このような解析をすると、最終的にどの天体に衝突したのかという結果だけではなく、軌道進化の過程における衝突確率も考慮できるので、より正確に見積もることができる。

表1 イトカワクローンの軌道進化

“運命”	個数	時間(万年)	
		最短	最長
太陽に衝突	14	30	5700
水星に衝突	1	5000	
金星に衝突	14	17	4300
地球に衝突	4	6	1300
木星に衝突	1	4400	
土星に遠へ	1	400	
1億年以上生き長らえる	4	—	

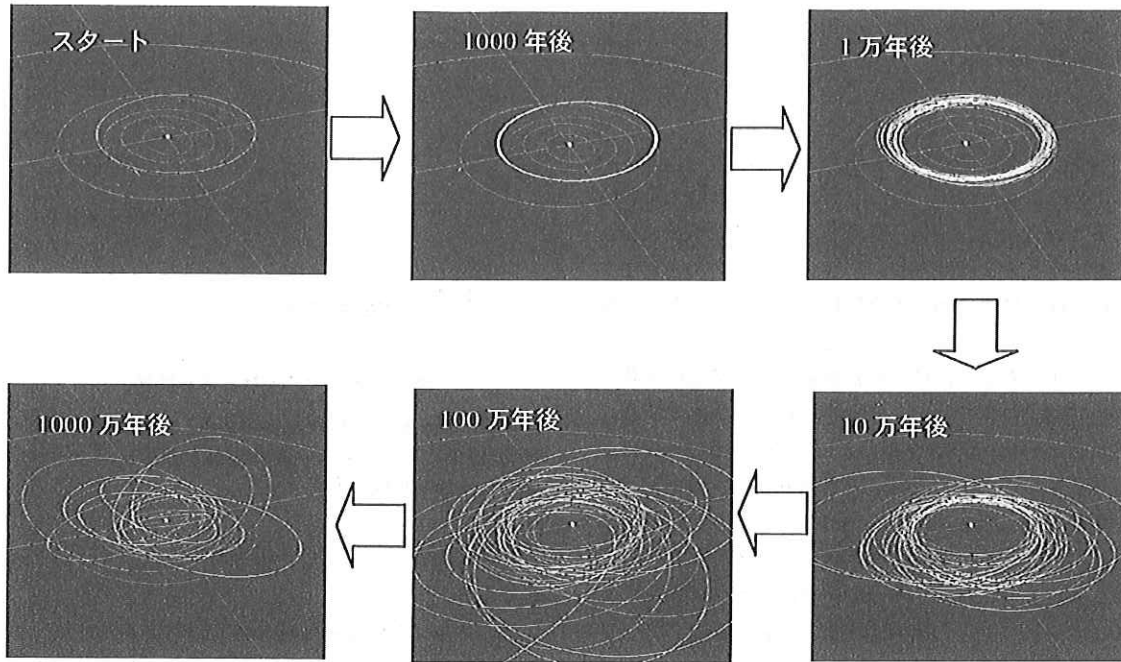
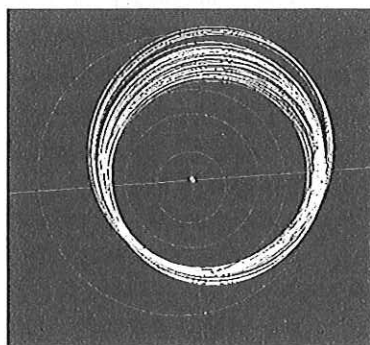
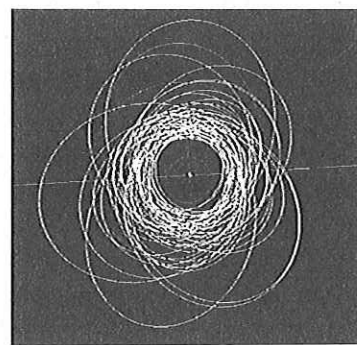


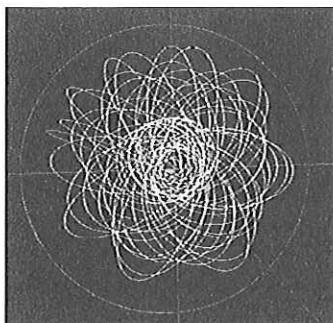
図4 “クローン”軌道の時間発展



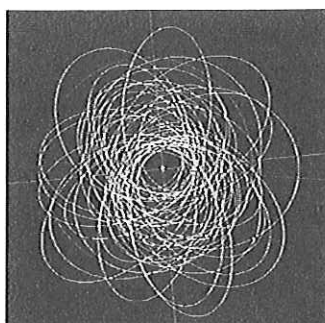
約6万年前で地球に衝突する場合



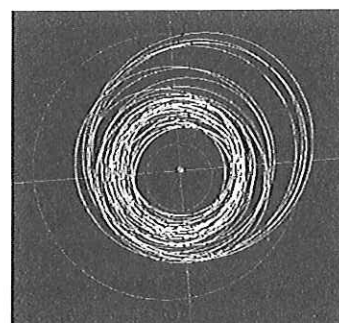
約1300万年前で地球に衝突する場合



約30万年前で太陽に衝突する場合



約5000万年前で水星に衝突する場合



約90万年前で金星に衝突する場合

図5 惑星に衝突するまでの軌道の変遷

表2 イトカワの惑星への衝突確率と衝突速度

	水星	金星	地球	火星
平均の衝突頻度	12 億 4280 万年 に1度	3370 万年 に1度	100 万年 に1度	8 億 7570 万年に 1 度
平均の衝突速度	19km/s	13.4km/s	13.4km/s	10.4km/s

このようにして求めたイトカワの惑星への衝突確率は、表2のようになる。従って、イトカワが最も衝突しやすい天体は地球であり、衝突の確率としては、100万年に1度程度ということになる。この値は、典型的なNEOと変わらないものである。

3.5 イトカワの過去

まず近い過去について、イトカワの軌道を調べるために、729個のイトカワ・クローンを設定して軌道進化を計算してみた。これらの軌道要素の変化は図6のようになる。

注目すべき点は、729個のイトカワ・クローンが一体となって動いているのは、過去へ200年程度であるということである。つまり、カオスのために、200年間くらいしか、軌道の精度をたもった計算ができないということになる。

今から約5000年前のこれらのイトカワ・クローンの軌道を描いてみると、図7のようになる。軌道はかなりばらついてはいるが、ここで黒い帯となっているところに実際のイトカワの軌道が存在していた可能性が高いことになる。つまり、現在の軌道とほぼ似たところに存在していた可能性が高い。

より昔については、Bottke et al. (2002)<sup>9)</sup>によ

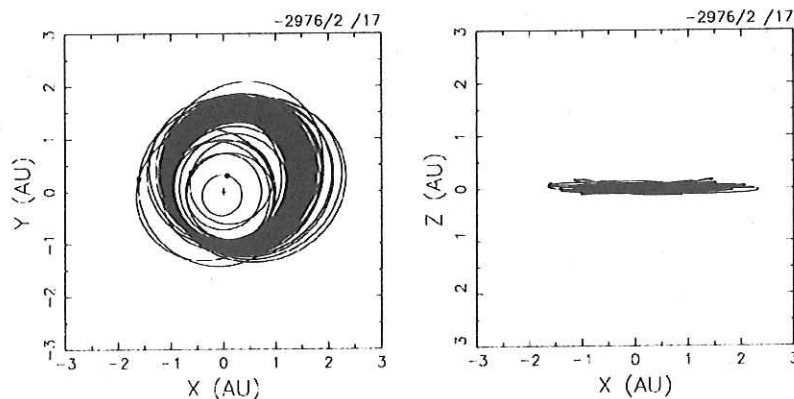


図7 約5000年前のイトカワ・クローン(729個)の軌道  
黄道面に投影した図(左)と黄道面に垂直な面に投影した図(右)

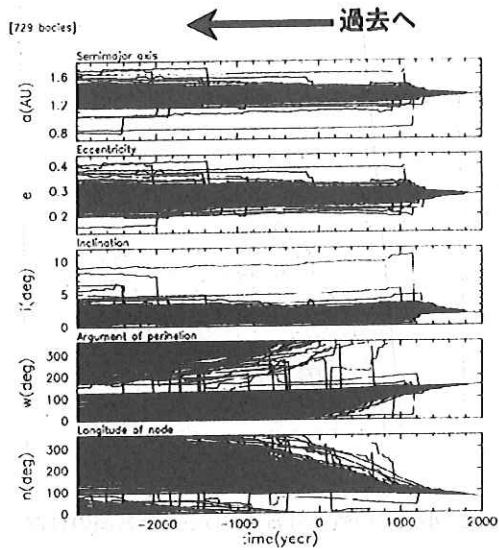


図6 イトカワ・クローンの軌道要素の変化

729個のクローンについて、過去へ軌道を計算し、軌道要素の変化を示した。(a:軌道長半径、e:軌道離心率、i:軌道傾斜角、w:近日点引数、n:昇交点経度

てつくられたNEO分布の定常モデルを適応することによって推定できる。ここでは、詳細は省略するが、イトカワは、永年共鳴 $\nu_6$ と呼ばれる領域か、火星軌道と交差するような軌道から現在の軌道に進化してきた可能性が高い。永年共鳴 $\nu_6$ の位置は図8に示す。基本的に、小惑星帯の太陽に近い側にイトカワの起源があった可能性が高いことになる。ただし、いつ現在のような軌道になったのかを特定するのは難しい。典型的なタイムスケールとしては、数百万年前と考えられる。(この進化のタイムスケールは、探査の結果を解析することによって推定できるかもしれない。)

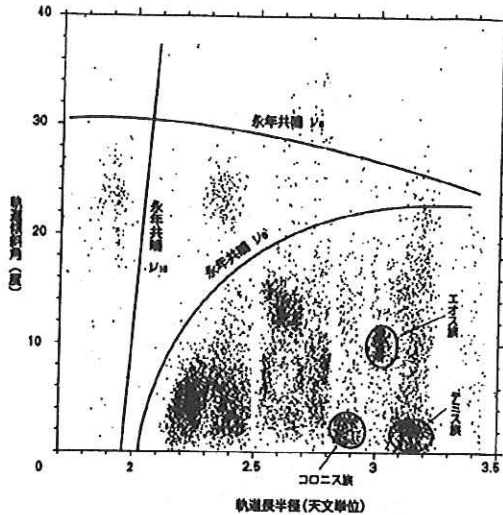


図8 小惑星の軌道分布における永年共鳴の位置

軌道長半径-軌道傾斜角の平面に永年共鳴の位置を示す。右下の小惑星の集まりは、「族(ファミリー)」と呼ばれるものである。

#### 4 まとめ

以上の結果を総合してイトカワの軌道進化をまとめると次のようになる。

##### ◆過去：

小惑星帯の太陽に近い側の縁付近に存在しており、永年共鳴 $\nu_1$ 、または火星軌道と軌道が交差する領域から、現在の軌道に達した。

##### ◆現在：

地球および火星に接近しやすい軌道にあり、カオス的な性質が強く、200年間程度しか精度を保った計算ができない。

##### ◆未来：

太陽ないし水星・金星・地球・火星に衝突する可能性が高い。衝突しないで生き残ったり、木星以遠に軌道が大きくなったりする場合もまれにある。地球との衝突確率は、約100万年に1度程度である。

つまり、イトカワは小惑星帯から地球に接近する軌道になり、そして太陽ないし地球型惑星に衝突するという典型的な地球接近小惑星 (NEO) の進化の過程にある可能性が高いということが分かった。「はやぶさ」の本来の目的は小惑星探査のための技術実証や小惑星のサイエンスを行うことであるが、それ以外に、「はやぶさ」で得られた情報は、地球に衝突しうる天体の素性を知るといふ、スペースガードの目的にとっても重要であるということになる。スペースガードの観点からも、「はやぶさ」が取得したデータの解析が重要である。

#### 参考文献

- 1) Michel, P., Yoshikawa, M., Earth impact probability of the Asteroid (25143) Itokawa to be sampled by the spacecraft Hayabusa, *Icarus* 179, pp.291-296, 2005.
- 2) Michel, P., Yoshikawa, M., Dynamical origin of the asteroid (25143) Itokawa: the target of the sample-return Hayabusa space mission, *Astronomy & Astrophysics* 449, pp.817-820, 2006.
- 3) Bottke, W., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J-M., Levson, H., Michel, P., Metcalfe, T., Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects, *Icarus* 156, pp.399-433, 2002.

(2008年3月22日受付, 2008年7月1日受理)