

小惑星探査機「はやぶさ」が成し遂げたこと

吉川 真 宇宙航空研究開発機構（JAXA）

「ね……ヒツジの絵をかくて！」

「え？」

「ヒツジの絵をかくて……」

これは、「星の王子さま」の初めの部分にある一節です*¹。砂漠に不時着した飛行士は、この言葉で王子さまと出会い、その後、現実とも夢の中とも区別のつかない時空の中で、王子さまと心の交流をすることになります。その交流の中から、飛行士は人間には欠けたものがあることを知るのです。

このサン＝テグジュペリの「星の王子さま」は、実に不思議な物語で、子供たちが読めばおとぎ話ですし、大人が読めば人間や社会に対する批判の書になります。そして、さらに、この物語が書かれた時代（1942年から1943年）や筆者の兵士としての人生と重ねてみると、この物語の奥には深いメッセージが隠されているかもしれないのです*²。

星の王子さまの住んでいる小惑星 B-612 は、何歩か歩くと一周できてしまうような小さな小惑星です。そのような小惑星は、実は架空のものではなく、実際にたくさん存在しています。そのような小惑星の探査に挑んだのが、日本の小惑星探査機「はやぶさ」です。「はやぶさ」が向かった小惑星イトカワは、B-612 より少し大きめで 500m くらいの長さがありますが、それでもちょっと歩けばすぐに裏側にたどり着いてしまう大きさです。このような小さな小惑星の探査は世界でも初めてのことですが、ここでは「はやぶさ」がどのようなことを成し遂げたのかについて紹介したいと思います。

1. 小惑星は、小粒でも…

小惑星というと、火星と木星の軌道間の小惑星帯にある石ころのような天体と思っている人が多いでしょう。確かにその通りです。もちろん、「石ころ」と言っても、大きいものでは直径が 900km 以上にもなります。また、星の王子さまの故郷のような、小さな小惑星もたくさんあります。そして、小惑星は太陽系のいたる所に存在するということもわかってきました。最果ての惑星である冥王星軌道付近にもたくさんの小天体が発見されていますし、地球のすぐそばにも多数の小惑星が飛びかっています。図 1 と図 2 に小惑星の分布の様子を示します。

冥王星軌道付近のものはエッジワース・カイパーベルト天体と呼ばれ、太陽系が生まれたときに誕生した「微惑星」のなごりではないかと考えられています。また、地球軌道付近にあるものは NEO（Near Earth Object：地球接近小天体）と呼ばれ、天体の地球衝突の問題（スペースガード）からも注目されているものです。



小惑星の王子様 (C)Akemi Ogura 2005

現時点（2006 年初め）で、軌道が算出されている小惑星は 32 万個近くにもなります。そのうち、軌道が正確に決定されて確定番号が付いているものが 12 万個余りです。そして、4000 個近くの NEO も発見されています。小惑星は、肉眼ではほとんど見ることができないような目立たない天体なのですが、数の上では太陽系の主役です。1801 年 1 月 1 日に最初の小惑星セレスが発見されてから、200 年余りが過ぎました。年々、発見される小惑星が増えています。特にここ数年間は発見数が急増しています。

小惑星と人類の関わりには、大きく 3 つの側面があります。まずは、太陽系の起源を探る惑星科学の鍵としての側面、そして地球に衝突して大災害をもたらす究極の脅威としての側面、さらに未来に人類が宇宙で暮らすようになったときに利用する資源としての側面です。小惑星は、宇宙の中ではちっぽけな存在ですが、人類にとってはいろいろな意味で重要な、まさに「山椒は小粒でもピリリと辛い」天体なのです。

*1：「星の王子さま」の訳文は、内藤濯氏訳の岩波少年文庫より。原書のタイトルは、Le Petit Prince。

*2：星の王子さまの世界、塚崎幹夫著、中公新書

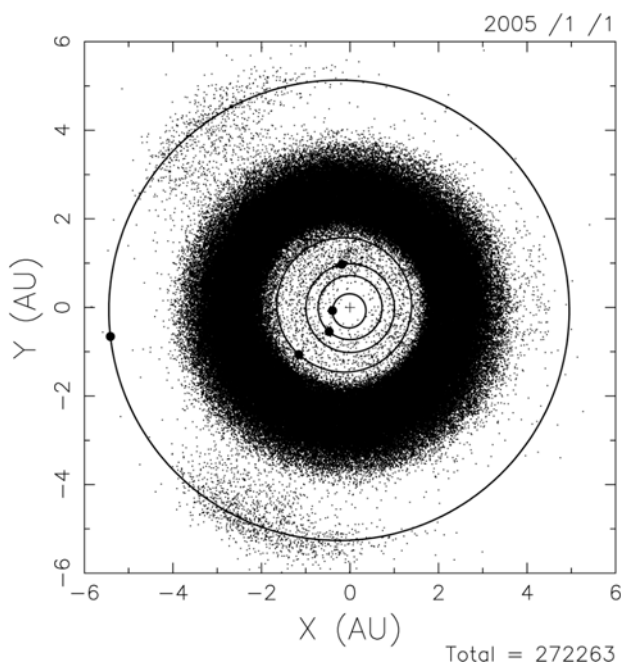


図 1：木星軌道までの小惑星の分布

ここでは、約 27 万個の小惑星の 2005 年 1 月 1 日の位置がプロットされている。惑星の軌道は、内側から水星、金星、地球、火星、木星。

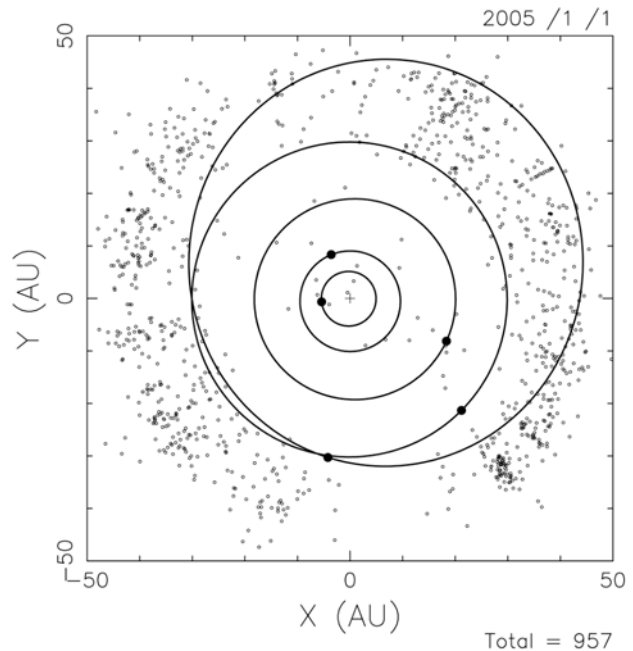


図 2：冥王星軌道付近の小惑星の分布

ここでは、軌道長半径が 30 天文単位より大きい小惑星約 950 個について、2005 年 1 月 1 日の位置がプロットされている。惑星の軌道は、内側から木星、土星、天王星、海王星、冥王星。

2. 「ペンシル」から「はやぶさ」へ

昨年（2005 年）秋には、小惑星探査機「はやぶさ」が大活躍しました。その詳細については、あとの章で詳しく紹介しますが、「はやぶさ」が打ち上げられたのは、2003 年 5 月 9 日のことです。2 年数ヶ月かかって、ようやく表舞台に登場したのです。

「はやぶさ」は、鹿児島県の内之浦から M-V ロケットによって打ち上げられました。もともと MUSES-C（ミューゼス・シー）という名前と呼ばれており、新しい宇宙工学の技術を実証することが目的の探査機です。同時に惑星科学においても最先端を目指していて、世界で初めて小惑星から表面物質を持ち帰るサンプルリターンを行います。表面物質を採取する方法が、あたかも鳥のハヤブサが獲物を捕獲するのと似ているので、打ち上げ成功と同時に「はやぶさ」と名付けられました。小惑星の起源や、太陽系誕生の謎を探ることが目標です^{*3}。

「はやぶさ」の目的地の小惑星ですが、その名前は「イトカワ」です。これは、日本のロケットの生みの親である糸川英夫博士にちなんで名付けられた

ものです。糸川博士によって作られた日本最初のロケットであるペンシル・ロケットの発射試験が行われたのが 1955 年のことでした^{*4}。それからちょうど 50 年後の 2005 年に、M-V ロケットによって打ち上げられた「はやぶさ」が、小惑星イトカワに到着したのです。ちょうど半世紀にわたる技術の進歩に、亡き糸川博士も感無量なのではないでしょうか。



図 3：「ペンシル」から「はやぶさ」へ
「はやぶさ」のイラストは、池下章裕氏による。

*3：「はやぶさ」ミッションの詳細は、JAXA のウェブサイト (<http://www.isas.jaxa.jp/>) を参照。

*4：糸川英夫博士については、ISAS ニュース 1999.4 NO.217 (<http://www.isas.jaxa.jp/docs/ISASnews/No.217/ISASnews217.html>) を参照。

小惑星イトカワですが、「はやぶさ」が探査をするということになったので、地上から多数の観測が行われました。アメリカでは、イトカワが地球に接近したときに強力な電波を当てるレーダー観測も行われました。「はやぶさ」がイトカワに到着する前には、そのようなデータを総合して、イトカワの形状が推定されていました。推定された形状は、差し渡し500m、幅が300m程度のサツマイモ型です(図4)。今までアメリカの探査機がいくつかの小惑星に行っていますが、それらは大きさが20kmないし60kmくらいありますので、これらに比べると桁違いに小さい小惑星なのです。まさに、星の王子さまの故郷のB-612に似たサイズの小惑星なのです。

今や我々は真のイトカワの姿を知っています。真のイトカワは、この事前の推定にそれなりには近い形でしたが、やはり印象としてはかなり違うということは、皆さん、ご承知の通りです。

3. 山超え、谷超え...

「はやぶさ」は、イトカワにたどり着くまでに、いくつかの試練をくぐり抜けなければなりません。最初の試練はもちろん打ち上げですが、その後、イオンエンジンがきちんと動作するか、1年後の地球スイングバイが正しくできるか、小惑星到着前の「合」を乗り切ることができるか、そして、最終的に小惑星に到着できるか、が主要な試練になります。

<打ち上げ>

打ち上げは正常でした。実は、2000年にASRT0-Eという衛星を打ち上げたのですが、そのときにはロケットの不具合によって、衛星打ち上げが失敗してしまったのです。その後、ロケットの問題箇所を修正したのですが、修正後の初めての打ち上げがこの「はやぶさ」だったのです。2003年5月9日13時29分25秒。青空に向かって「はやぶさ」は飛び立ったのです(図5)。



図5:「はやぶさ」の旅立ち

2003年5月9日、「はやぶさ」はM-Vロケットで宇宙空間へと飛び立った。

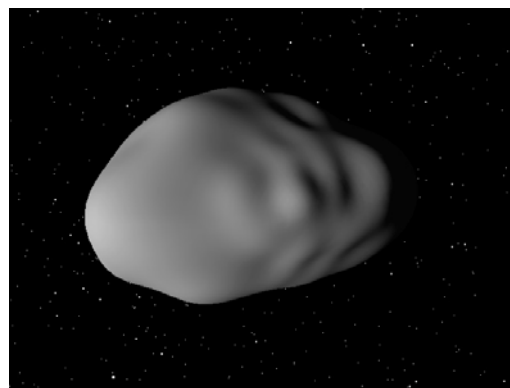


図4:事前推定された小惑星イトカワの形状

JPLのOstro氏のモデルを使ったCG(JSGA 西山広太氏作成)からの一場面。

<イオンエンジン>

打ち上げ後は、太陽電池のパドルを開いたり、小惑星表面の物質を取るための足のようなもの(サンプラー)を伸ばしたりなど、慌ただしい作業が続きます。一連の作業が終わると、いよいよ最新鋭のエンジンであるイオンエンジンの点火です。イオンエンジンとは、イオン化したガス(プラズマ)を高速で噴出するエンジンです(図6)。「はやぶさ」の場合、キセノンというガスをイオン化して噴出するのですが、イオン化したりプラズマを高速に加速したりするのは、太陽電池で発電した電力を使います。つまり、このイオンエンジンのためには、燃料を持っていかなくてよいので、非常に省エネのエンジンになっているのです。なお、イオンエンジンの場合、その力(推力)は弱いですが、長時間にわたって連続運転することで、探査機の軌道をじわじわ変えていくことになります。

日本では初めてイオンエンジンを惑星間空間で使



図6:イオンエンジンの動作試験

キセノンをプラズマ化し高速で噴射する。

うことになったわけですが、それも最初からぶっつけ本番です。ですが、イオンエンジンの点火も無事にできました。ただし、予定されていた動作と少し異なる動作も見られ、その後、探査機の運用においては、いろいろな工夫がなされることになります。とにかくすべてが初めてですので、何が起こるかは分かりません。もちろん、起こりそうなことは事前にいろいろ検討しておくわけですが、予想外のことが必ず起こります。その場合でも、慌てずに対応策を考えます。マニュアルに縛られているようでは、最先端のことはできません。

最終的には、イオンエンジンは、2003年5月末から2005年8月末まで動作し続け、最終的には延べ作動時間が2万5,800時間に達しました。この間、キセノンは約22kg消費され、合計で1,400m/sに相当する加速をしたのです。イオンエンジンは無事にその役目を果たして往路を「完走」し、「はやぶさ」をイトカワに送り届けることができました。

＜地球スイングバイ＞

次の試練は、地球スイングバイです。打ち上げられてから約1年後の2004年5月19日に、「はやぶさ」は地球に戻ってきました。戻ってくるまでの最初の1年の間は、「はやぶさ」は地球からはそれほど離れずに太陽の周りを一周します。そして、5月19日に地球に3700kmまで接近して、地球の重力を利用して小惑星に向かう軌道に乗ったのです。

「はやぶさ」が地球スイングバイを行った様子が図7です。

スイングバイというのは、天体の引力を利用して探査機の軌道を変更する技術です。探査機の軌道を変更するためには、普通は探査機に積まれたエンジンを吹かすのですが、スイングバイを使うと燃料を節約できます。「はやぶさ」の場合、単なる燃料の節約ではなくて、スイングバイを行わないと小惑星に



図8：小惑星到着までの「はやぶさ」の軌道

最初の1週は地球軌道とほぼ同じ軌道上を動き、地球スイングバイによって、イトカワの軌道の近い軌道に移る。

たどり着くことができません。ですから、非常に重要なものになります。

スイングバイで地球に戻ってくるのなら、それまでの1年間が無駄になっているかのように見えるかもしれませんが。実は、この1年の間、イオンエンジンによって、「はやぶさ」の軌道は徐々に変えられていたのです。別の言い方をすれば、「はやぶさ」の軌道にエネルギーが溜め込まれていたと言ってもいいでしょう。その溜め込まれたエネルギーをスイングバイによって一気に吐き出して、小惑星とほぼ同じ軌道に乗ったわけです（図8）。

スイングバイでは、正確な軌道制御が必要になりますが、地球への最接近位置の誤差が1km程度という非常に高精度での制御が達成されました。約1億5千万kmの半径の円軌道を描いてきた探査機がわずか1kmの誤差で制御できていることに注目してください。スイングバイ時に、「はやぶさ」は地球の鮮やかな姿を撮影しました（図9）。そして、スイングバイの後は、「はやぶさ」は一路小惑星を目指して飛行していきました。

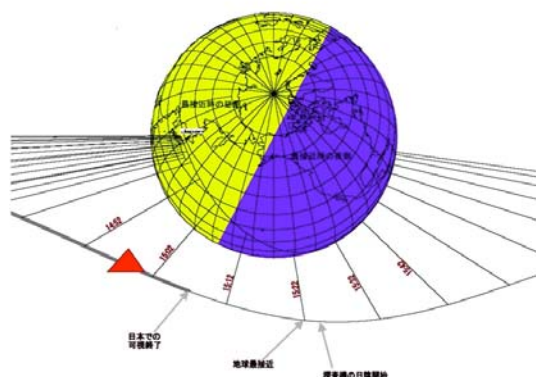


図7：地球スイングバイ時の「はやぶさ」の経路

「はやぶさ」は日本付近を目指して飛行してきて、太平洋上空で地球に最接近した。

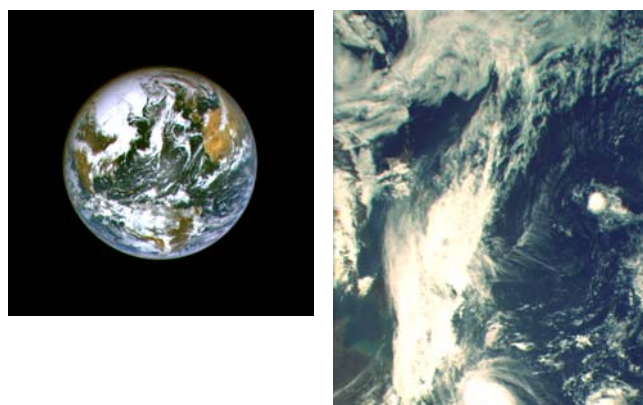


図9：スイングバイ時に「はやぶさ」が撮影した地球

左は、約30万kmの距離から撮影した大西洋付近。右は約6万kmの距離から撮影した日本上空。北海道の一部が左中ほどに見えるが、日本列島のほとんどは台風からのびる雲に覆われている。

＜合＞

スイングバイの後は、イトカワまでの距離がどんどん短くなっていくわけですが、「はやぶさ」の軌道では小惑星到着の前に、「合」という現象が起こります。地球から見た惑星の位置について、内惑星でしたら、内合・外合、外惑星なら合・衝と呼ぶ現象があります。「はやぶさ」の合も、ここででてくる「合」と同じものです。つまり、地球から見た「はやぶさ」の位置が太陽の方向に重なってしまうのです。

図 10 に、地球から見た「はやぶさ」が太陽に対してどのあたりを通過したのかが描かれています。

「はやぶさ」は、太陽に完全に隠されるわけではないのですが、太陽に非常に接近していることがわかります。もちろん、実際に「はやぶさ」が太陽に近づいているわけではなく、「はやぶさ」は地球から見て太陽とちょうど反対側に位置しているのですが、見かけ上、太陽のそばに位置するのです。

合になると、太陽の影響を強く受けて、探査機との通信が困難になり、探査機の軌道決定も不可能になります。探査機の軌道を決めるためには、追跡局と探査機間の距離であるレンジと、視線方向（追跡局と探査機を結ぶ方向）の速度であるレンジレートを計測しますが、特にレンジレートにおけるノイズは、合に近づくにつれて急速に大きくなります。つまり、データの誤差が大きくなってしまうわけです。そのために、軌道決定精度にも悪影響を及ぼすことになります。実際、合の最中には通信ができなくなったり、合の終わりくらいには探査機の位置の決定誤差が 2000km ほどまで増大したりしました。ですが、この合も無事に乗り切ることができ、いよいよ小惑星への最終アプローチに入ります。

4. イトカワが見えた！

合のあと、最初の大きな運用は、小惑星イトカワ

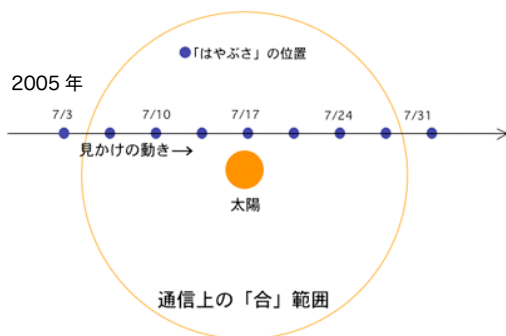


図 10：合付近の太陽との位置関係

太陽の視直径は、約 0.53 度。探査機と通信をする上で合の影響を強く受ける範囲は、太陽からの離角が 3 度以下の領域である。

の撮影でした。ただし、本来、小惑星を撮影するためのカメラ（ONC-T という名前が付いています）は、まだ使えません。それは、このカメラを小惑星方向に向けるように姿勢を変更してしまうと、太陽電池のパドルに太陽光がよく当たらなくなってしまうためです。そのために、探査機の姿勢を決めるのに使っているスタートラッカ（星姿勢計）を使って、イトカワの撮影を試みました。スタートラッカでは、ONC-T に比べると画像の精度が悪いのですが、撮影できれば「はやぶさ」の軌道決定に非常に役に立ちます。

スタートラッカによる初めての撮影は、2005 年 7 月 29～30 日に行われました。このときには、予想されていた位置に近いところにイトカワが撮影され、「はやぶさ」の軌道制御で大きな間違いはなかったことが確認されました。その後、8 月 8～9 日と 8 月 12 日にもスタートラッカによる撮影が行われ、合計 24 枚のイメージが撮影されました。撮影の目的は、光学航法と言って、これまでは、電波によるレンジとレンジレートによって「はやぶさ」の軌道決定を行っていたのですが、さらにカメラで撮影した小惑星の位置情報も使って、「はやぶさ」の軌道を決めるのです。この光学航法はうまくいって、「はやぶさ」の軌道決定の精度を一気に向上することができ、位置誤差が 1km 程度にまで小さくなりました。

図 11 が、最初に撮影されたイトカワの画像です。7 月 29～30 日、8 月 8～9 日、8 月 12 日に撮影されたイトカワのイメージを合成してあります。イトカワも動いていますが、むしろ「はやぶさ」の動きによって、イトカワが見える位置が変化していくことになります。

2005 年 8 月 12 日の時点で、「はやぶさ」は小惑星イトカワに約 35,000km まで接近しています。これは、地表から静止軌道にある衛星までの高度とほぼ等しい距離です。あとわずかですが、まだカメラ

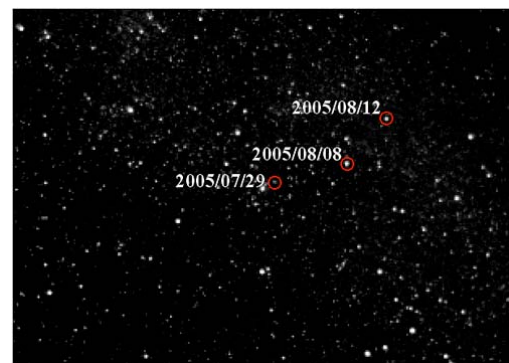


図 11：「はやぶさ」が初めて撮影した小惑星イトカワ

では点像にしか写りません。8月28日には、イオンエンジンを止め、そして8月末には小惑星から3500kmくらいの地点に達し、いよいよイトカワ到着間近になりました。

5. イトカワに到着

「はやぶさ」は、イオンエンジンを止めた後もさらにイトカワに接近を続けました。撮影されるイトカワの像は、だんだんと大きくなっていきます。その様子を図12に示します。イトカワに1000kmまで接近してもまだほとんど点にしかみえませんが、100kmくらいまで接近すると形が分かってきます。そして、2005年9月12日、ついに「はやぶさ」はイトカワに到着したのです。そのときの距離は、イトカワから20km。この位置でいったん、「はやぶさ」はイトカワに接近するのをやめました。この位置を、ミッションチームではゲートポジションと呼んでいます。ここに3週間ほど滞在して、まず、イトカワの様子をじっくり眺めようというわけです。

図13に、「はやぶさ」がゲートポジションから撮影したイトカワの写真を示します。最初にこのイトカワの素顔を見たときには驚きでした。さらにいろいろな方向からイトカワを撮影したものが図14です。



図12: 「はやぶさ」がイトカワに接近しながら撮影した写真

2005年9月4日(距離1000km)から、9月10日(距離30km)まで。視野は約1度四方。

図13: ゲートポジション付近から撮影されたイトカワ

2005年9月12日。約2度四方。

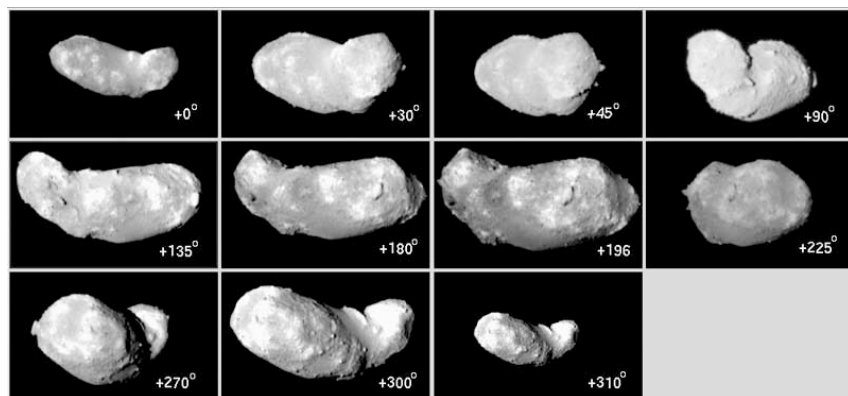
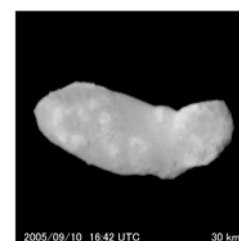
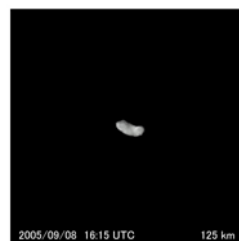
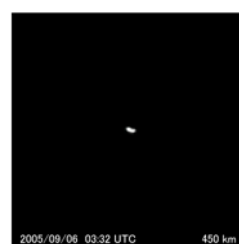
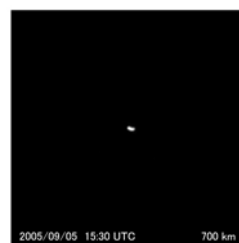
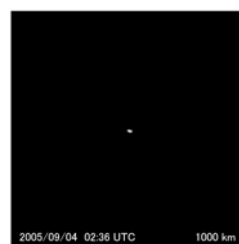


図14: イトカワの自転のようす

2005年9月11日および12日に撮影された画像。

イトカワの表面は、予想していたものとは全く違っていました。今まで、至近距離で撮影された小惑星は、ガスプラ、イダ、マチルダ、エロスがあります。そのどれもが、表面に多数のクレーターを持っていた(図15)。ところが、イトカワの表面にはクレーターが少ないのです。クレーターらしきものは無いのですが、イトカワの表面を見るとぼつぼつしたイボのようなものが多数ありますし、突き出たようなものが多数あります。いったいどうしてこのような表面になっているのでしょうか。





Gaspra



Ida とその衛星 Dactyl



Mathilde



Eros

図 15：今までに探査された小惑星

ガスプラとイダはガリレオ探査機で、マチルダとエロスは、ニア・シューメイカー探査機で撮影された。これらの小惑星は、イトカワに比べると大きくて、この中で最も小さいガスプラも差し渡し 18km 以上ある。(NASA/JPL の Web より)

6. イトカワの不思議な世界

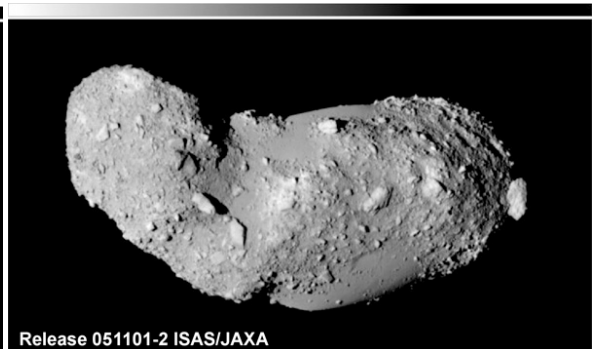
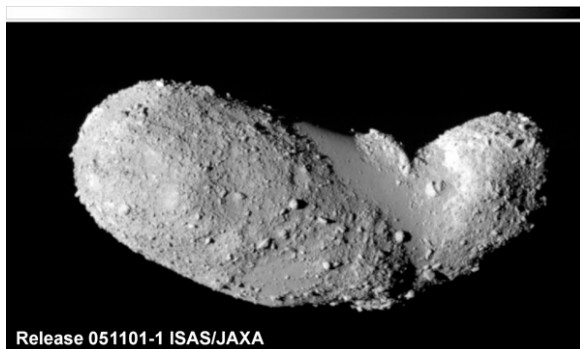
「はやぶさ」は、10 月 3 日には、ホームポジションと呼ばれるイトカワから 7km のところに移動しました。イトカワのように大きさが 500m くらいしかないような天体に探査機がランデブーするのは世界でも初めてのことです。もちろん、イトカワからの重力は小さいわけで、そのような微小重力下での軌道制御が実際どのように行えるのか、非常に興

味がありました。

「はやぶさ」は、地球とイトカワを結ぶ線上付近にその位置が保持されました。これは、地球との通信や太陽の方向など総合的に考慮して、イトカワに接近するためのベストポジションと考えられたからです。ただし、その位置で制御をしないでおきますと、次第にイトカワに接近していきます。これは、イトカワの引力にもよるのですが、むしろ太陽の光の圧力（太陽輻射圧）によって押されているためです。「はやぶさ」から見ると、太陽も地球とほぼ同じような方向にありますので、太陽光線が「はやぶさ」をイトカワの方向に押すようになっているのです。

放置しておくともイトカワに衝突してしまいますから、ゲートポジションやホームポジションでは、時々、「はやぶさ」をイトカワから遠ざける方向に加速しました。イトカワから 20km のゲートポジションでは、イトカワの引力による力は太陽輻射圧の数%しかありません。7km のホームポジションでも、イトカワの引力よりも太陽輻射圧の方が大きいのです。イトカワという天体が本当に小さなものであることが分かります。ちなみに、イトカワの表面から脱出するための速度（脱出速度）は、わずか毎秒 10cm 程度なのです。イトカワ表面でちょっとジャンプしたら、そのまま宇宙空間に飛び出してしまうことになります。

さて、10 月までの観測で、イトカワについてかなり詳しく分かってきました。図 16 には、イトカワを 4 つの方向から撮影した写真を示します。イト



イトカワ・ラッコ

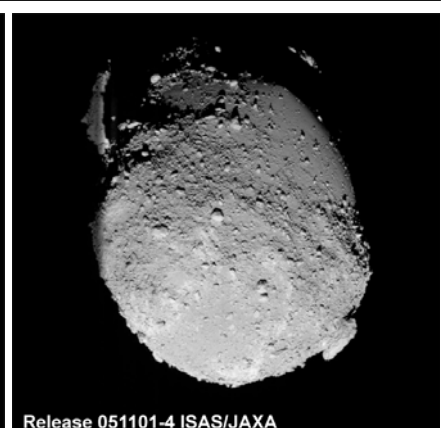
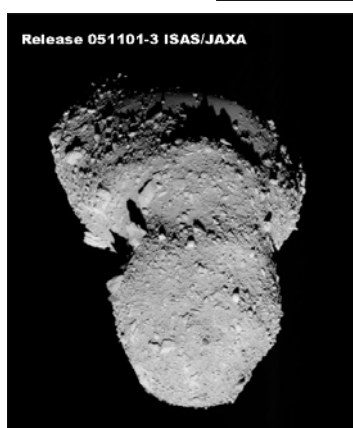


図 16：4 つの方向から見たイトカワの姿

カワの表面の大部分が、ごつごつした岩で覆われていることが分かります。このごつごつした岩のことをボルダーと呼びます。ボルダーは、小惑星に天体が衝突して飛び散った破片からなると考えられていますが、イトカワの場合、ボルダーの大きさに対応するようなクレーターが見当たりません。そのために、ボルダーの起源が謎の一つになっています。

さらに表面を拡大した写真が図 17 です。こちらの写真では、より細かい構造が分かります。イトカワの表面は、ごく一部を除いて、平らな部分がないのです。これには困りました。「はやぶさ」がタッチダウンできる場所が限られてしまうからです。平らな部分は、「ミューゼスの海 (MUSES-Sea)」と名付けられたところくらいしかありません。もう1つの候補は、「ウーメラ砂漠 (Woomera Desert)」と名付けたところです。図 17 には、「はやぶさ」がタッチダウンできそうな候補地が、Point A および Point B として記載されています。実は、その後の詳細な観測によって Point B の方はでこぼこだらけということが分かり、タッチダウンはミューゼスの

海の領域だけ可能ということになりました。可能な場所があっただけ幸運なのかもしれません。(注：ウーメラ砂漠という名前ですが、すでに火星の地名に使われているので同じ名前にするのはよくないという意見が出され、名称としては、現在、再検討中です。ここでは、このままウーメラ砂漠と呼ぶことにします。)

観測が進むにつれて、イトカワの詳しい物理情報が得られてきました。例えば、図 18 は、イトカワの形状モデル上に、推定された表面重力の分布を示したものです。また、図 19 は、緯度方向の傾斜マップですが、このような情報は、「はやぶさ」がタッチダウンを行うときに非常に重要なものです。以上は光学カメラで撮像された画像の情報に基づいて得られたものですが、その他、近赤外分光器、X線分光器、レーザ高度計による観測も着々に行われました。また、「はやぶさ」の飛跡からイトカワの質量の推定も進められました。

そして、10 月末には、タッチダウンを行う準備が整ったのです。

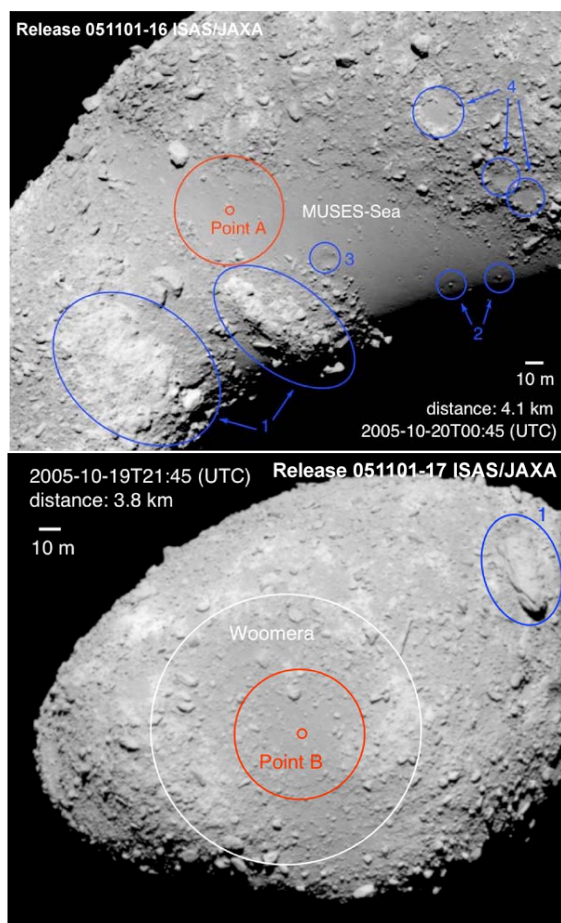


図 17：タッチダウン候補地点の詳細な画像
上が「ミューゼスの海」周辺、下が「ウーメラ砂漠」周辺の写真である。

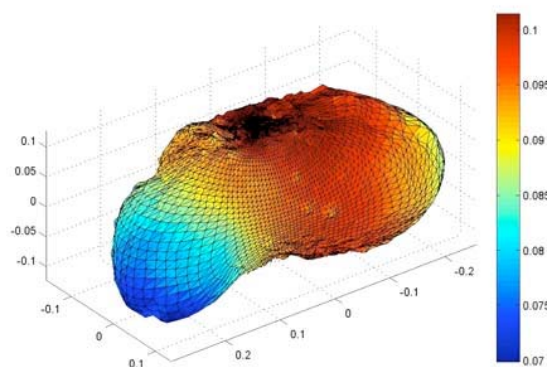


図 18：イトカワの形状と重力分布の解析例
表面の色は、重力の強弱を表す。

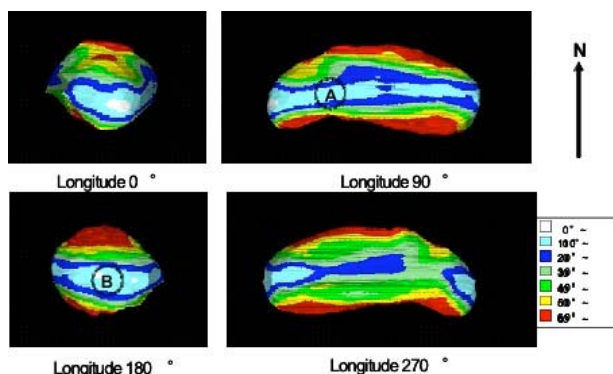


図 19：イトカワの軽度方向傾斜マップの解析例

7. 「はやぶさ」の挑戦

2005年11月。いよいよ、「はやぶさ」の挑戦が始まりました。以降は、日付を追って、「はやぶさ」の行動を紹介します。

<2005年11月4日>

タッチダウンの準備は整ったと言っても、いきなり表面に降りるのは危険ですから、まずはリハーサルの降下試験を行いました。この試験は、「はやぶさ」に搭載されているレーザ高度計の較正や、ターゲットマーカや画像処理の確認、そして探査ロボットミネルバの投下が目的でした。高度3.5km付近から降下を開始し、高度700mくらいまでは順調に進みましたが、その地点で、自立航法機能の航法誤差が大きくなりすぎたために、地上からの指令で降下を中止し「はやぶさ」は小惑星から離れたのです。

その後の解析で、自立航法機能における画像の逐次処理に問題があったことが分かりました。「はやぶさ」は小惑星を撮影しながら接近していきますが、撮影された写真から小惑星の中心を計算します。ところが、イトカワの場合、形がいびつですし、光の当たり方によっては、複数の天体に分かれて認識されてしまうのです。このために、自立航法機能が正常に働かなかったのです。原因が明らかになったので、その対処方法も検討されました。また、姿勢制御のための装置（リアクションホイール）3台のうち2台が壊れてしまっているのも、スラスタ（ジェットを吹くもの）で姿勢制御をしているのですが、

これに起因する並進加速度が大きく、機上の自律機能だけでは制御が難しいため、地上からの補助も必要であることが分かったのです。

このように、リハーサルとしては予定通りには行きませんでした。探査機の制御に関連していろいろなことを知ることができたことは、大きな収穫でした。さらに、このときの接近で、ウーメラ砂漠を撮影することができたのも成果でした。そのウーメラ砂漠の写真を図20に示します。比較的平らに見えた場所も、拡大してみると大きさが数メートルクラスの岩がごろごろしていることが分かります。これでは、「はやぶさ」は降りることができません。ということで、タッチダウン候補地は、ミューゼスの海だけになったのです。

<2005年11月9日>

11月4日の降下試験で、タッチダウンをするためにはさらに航法誘導機能の確認を行う必要があることが分かったので、そのための接近運用を試みました。目的は、小惑星を認識する画像処理、地上からの補助的航法機能、そして近距離レーザ距離計の機能などの確認、またターゲットマーカの分離試験です。

このときの探査機の高度の履歴は図21のようになりました。最初、高度が70mくらいまで接近し、その後、一度3kmくらいまで離れてから再び500mくらいまで接近したのです。表面すれすれと言っていいくらいまで接近したときに撮影した画像が図22です。これはウーメラ砂漠付近の画像ですが、



図20：11月4日のリハーサル降下で撮影されたウーメラ砂漠の写真
四角の枠内が拡大されて撮影されている。

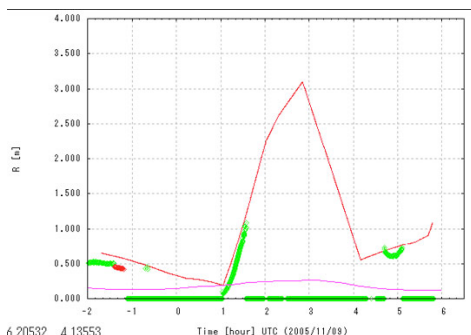


図21：11月9日の降下試験の高度変化
上下方向に変化している実線がレンジデータによって推定された小惑星までの距離。太い線は、レーザ高度計による計測値。また、下方にあるほぼ水平な線は、イトカワの表面を示す。

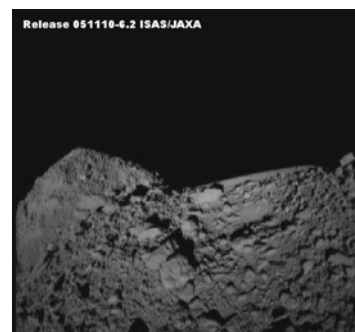


図22：ウーメラ砂漠領域のクローズアップ写真（11月9日）



図 23：ミューゼスの海の領域のクローズアップ写真

四角の枠内が拡大されて撮影されている。赤線は 10m の長さを示す。イトカワの全体写真の方には、「はやぶさ」の影も写っている。

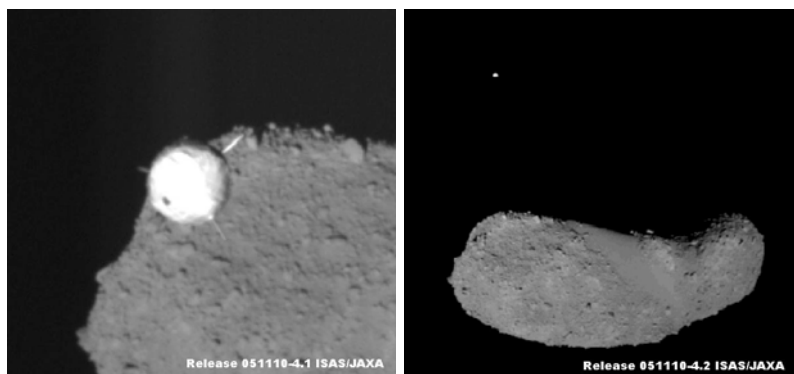


図 24：分離されたターゲットマーカ

分離直後と少し遠ざかってからのターゲットマーカの様子

最大の岩塊の大きさが 20m くらいです。また、ミューゼスの海のクローズアップ写真も撮影しました（図 23）。ミューゼスの海も詳細に見ると大きさが数メートルの岩がありますが、他の領域に比べれば平らな部分が多いことがわかります。

そして、2 度目に 500m くらいまで接近した時には、ターゲットマーカの分離試験をしました。放出されたターゲットマーカの写真が図 24 です。ターゲットマーカが正常に分離されたことや、フラッシュランプによる撮影、また画像処理によるターゲットマーカの位置推定機能などが正常に働くことが確認されました。なお、このときに分離されたターゲットマーカは、小惑星表面には落ちていません。ただし、このターゲットマーカには、88 万人の名前が入ったものではありません。88 万人の名前入りのターゲットマーカは、本番に向けて温存してありました。

図 22 にも「はやぶさ」の影が小さく写っていますが、より鮮明な影が撮影されたのは図 25 です。この写真で、「はやぶさ」が確かに小惑星イトカワの周りにいることが実感されました。

<2005 年 11 月 12 日>

上記の 2 回の降下運用を受けて、さらにリハーサル降下が行われました。今回の目的は、タッチダウンに向けた誘導航法機能の確認、近距離レーザー距離計の較正、探査ロボット「ミネルバ」の投下です。

このときの最低到達高度は 55m ほどでした。

ミネルバは、所定の高度に達したと思われた時点で、地上から分離コマンドが送られましたが、タイミングが悪かったことに、コマンドが「はやぶさ」に届いたときには、「はやぶさ」が上昇方向に動いているときで、その高度は 200m くらいのときでした。また、そのときの「はやぶさ」の上昇速度が小惑星からの脱出速度（秒速 10cm くらい）を少し上回っていたため、分離されたミネルバは小惑星方向には落ちていかずに、小惑星からは離れてしまったのです。ですが、分離されたミネルバと「はやぶさ」とは正常に通信が行われ、ミネルバが撮影した「はや



図 25：「はやぶさ」の影

ぶさ」の太陽電池パネルの写真が、「はやぶさ」を経由して送られてきました（図 26）。また、「はやぶさ」からは、遠ざかっていくミネルバが撮影されています（図 27）。ミネルバが正常に機能していただけに、イトカワ表面に降ろすことができなくて非常に残念でした。ですが、ミネルバの工学的な試験は、ほぼ達成できたことになります。

この降下リハーサルでは、イトカワの表面のさらに詳しい写真が撮影されています。その一例を図 28 に示します。この写真では、数 cm 程度の粒子まで分かります。別の写真では、さらに細かいところまで表面が写されたものがあります。これほど、細かく小惑星の表面を見たのは、「はやぶさ」が初めてです。

<2005 年 11 月 20 日>

いよいよ、イトカワにタッチダウンを試みることになりました。「はやぶさ」は、11 月 19 日の午後 9 時にイトカワから約 1km の地点から降下を開始しました。そして、20 日の午前 4 時 33 分に、地上からの指令で最終の垂直降下を開始しました。その速度は、毎秒 12cm です。午前 5 時 28 分に、高度 54m に達したときにターゲットマーカの拘束解除

の指令を出し、その後、高度 40m 付近で探査機地震の降下速度をほとんどゼロに減速することで、ターゲットマーカが先に小惑星表面へと降りていきました。ターゲットマーカが表面確かに降りたことは、画像で確認されています（図 29）。このターゲットマーカには 88 万人の名前が入っており、「はやぶさ」は無事に 88 万人の名前をイトカワに届けることができたのです。

図 30 には、「はやぶさ」がイトカワに接近していったときの軌道を示します。地球から見れば、「はやぶさ」はイトカワに向かってほぼまっすぐに降りていったのですが、実際にはイトカワは自転しています。ですから、降下の最終段階にならないと、タッチダウンの場所は見えてきません。もちろん、小惑星の自転を計算にいれて、「はやぶさ」の軌道を制御しています。

ターゲットマーカを切り離した後、高度 35m で高度測定のための計器をレーザ高度計から近距離レーザ距離計に変え、高度 25m で降下速度をほぼゼロにしたホバリング状態に入りました。その後、5 時 40 分くらいには、高度 17m くらいで小惑星表面に平行になるような姿勢モードに移行しました。そのために、地上との情報のやり取りができなくなり、

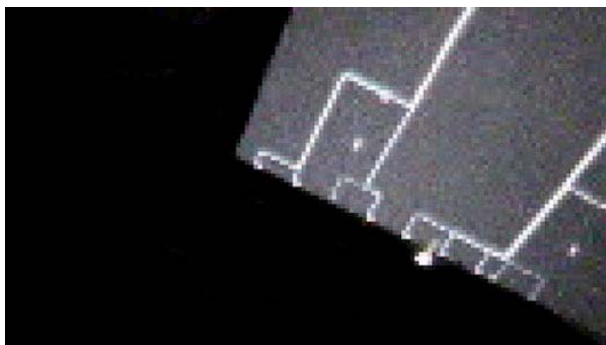


図 26：ミネルバから撮影された「はやぶさ」の太陽電池パネル



図 27：「はやぶさ」から撮影されたミネルバ

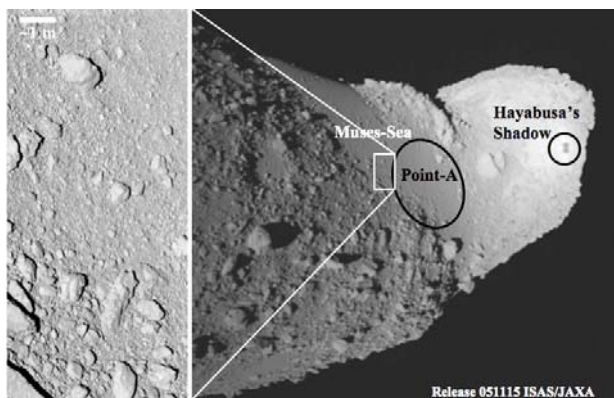


図 28：ミューゼスの海の領域の詳細画像



図 29：「はやぶさ」から投下されたターゲットマーカ
「はやぶさ」の影のすぐ隣に光る点が 88 万人の名前入りのターゲットマーカである。

ビーコン信号だけになりました。ビーコン信号は情報が乗っていない電波ですが、それを受ければ探査機が「生きている」ことがわかるだけでなく、その周波数の変化を見ることで、探査機の視線方向の速度を知ることができます。これ以降は、このビーコン信号による視線方向の速度が、唯一の情報になりました。この視線方向の速度のことを、ドップラーまたはレンジレートと呼びます。

さて、実はその後のドップラーデータの様子が不可解だったのです。図 31 にドップラーデータを示します。負の値は探査機が小惑星に接近する速度を示し、正の値は小惑星から離れる方向の速度です（ただし、厳密には少し違う点もありますが、ここでは詳細は省略します）。すでに述べたように、垂直降下開始後は、秒速 12cm ほどで小惑星に接近しました。探査機は、小惑星の引力による加速をキャンセルするために、微小な速度制御を頻繁に行っていることが分かります。そして、降下速度が毎秒 9cm くらいになったときに、降下速度をゼロにしました。このときにターゲットマーカの固定ははずされていたので、慣性によってターゲットマーカは探査機から離れて落ちていきました。

問題はその後です。いったん速度が大きく振れ、そして探査機の速度がじわじわと小惑星に向かって増速していくように見えたのです。小惑星に向かって速度が上がっているとすれば、すぐに表面に接触して、サンプル採集を行い、速度は一気に上昇に転じるはずですが、10 分、20 分、30 分と待っても小惑星に向かって速度が増えていくようにみえました。何が起こったのか、そのときには全く分かりませんでした。小惑星表面をはずして、裏側に回ってしまったのでしょうか。とにかく、「はやぶさ」には緊急に離脱するコマンドが送られ、「はやぶさ」は小惑星から離れることになりました。その後、11 月 21 日と 22 日を使って、「はやぶさ」の制御

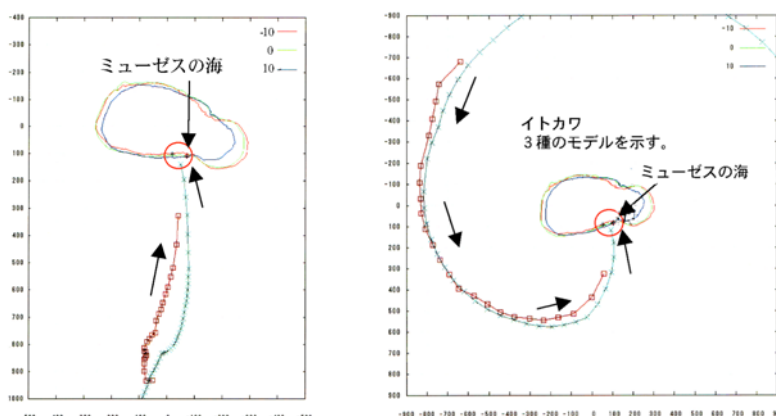


図 30：イトカワに対する「はやぶさ」の軌道

左は、慣性座標系における軌道で、地球から見た軌道に対応する。また、右は小惑星から見た軌道である。左の図においては、自転による小惑星の向きの変化は省略されている。×印が付いた軌道が計画軌道で、□印の軌道が実際の軌道である。

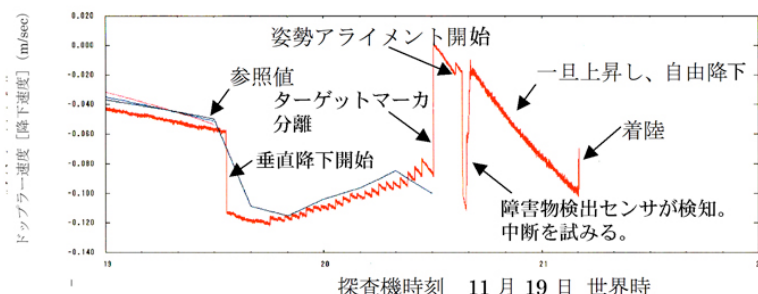


図 31：11 月 20 日のタッチダウン時のドップラー速度変化

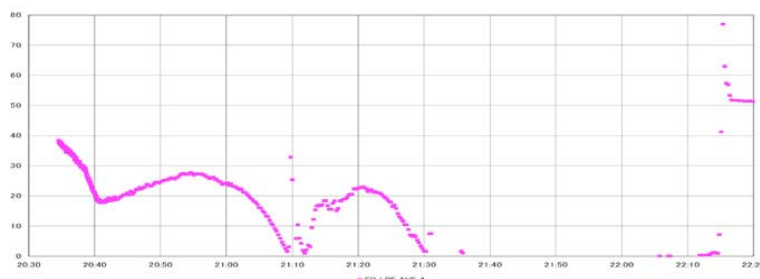


図 32：11 月 20 日の最終降下時の近距離レーザ距離計の測定値
(横軸：時刻、縦軸：距離m)

の建て直しをしました。

その後、「はやぶさ」からデータを降ろして確認したのですが、予想外のことが起こっていることが分かりました。なんと「はやぶさ」は小惑星の表面に着陸していたのです。データの一例として、近距離レーザ距離計の計測値を図 32 に示します。「はやぶさ」は最終降下の途中で、障害物検出センサーがなんらかの反射光を検出したため自ら降下の中止を決めて離脱しようとした。しかし、姿勢の範囲が許容内になかったため、離脱の加速をせずにそのまま降下を続けたのでした。図 31 の最後でなかなか小惑星の表面に到着しないように見えたのは、ゆっくりと降下をしているときだったのです。そして、図 32 を見ると分かるように、小惑星表面で 1 回バ

ウンドします。その後、表面から離脱のコマンドが届くまで、約 30 分間、イトカワの表面に留まっていたのです。

残念ながらこのときは、サンプルを取得するための弾丸は発射されませんでした。ですが、表面に触れたときに、塵がサンプル収納容器に入っているかもしれません。そのために、このとき開いていた収納容器はフタをされることになりました（収納容器はもう 1 つあります）。そして、このタッチダウンを行ったときに、「はやぶさ」は、世界で初めて小惑星から離陸した宇宙機となったのです。よく考えると、地球以外の天体から宇宙機が離陸したことがあるのは、月しかありません。つまり、「はやぶさ」は、地球と月以外の天体から離陸した人類初の宇宙機となったのです。

<2005 年 11 月 26 日>

「はやぶさ」は 2 回目のタッチダウンを試みました。11 月 25 日午後 10 時ごろに、「はやぶさ」は、地上からの指令で高度 1km ほどのところから降下を開始しました。この 2 回目も 1 回目とほとんど同じ経路で小惑星に接近し、ほとんど同じ場所に降下しました。同じ場所ですから、すでに前回投下したターゲットマーカが存在しています。そのために、

今回はターゲットマーカの投下は行わないことになりました。果たして、「はやぶさ」が目標地点に接近していくと、そこには、前回投下した 88 万人の名前が入ったターゲットマーカがあり、きちんと道案内をしてくれたのです。

すでに 5 回もイトカワに接近する運用を経験していますから、「はやぶさ」は非常に順調に小惑星に接近していきました。接近の過程で撮影された写真を、連続的に並べたものが図 33 です。まさに計算通りに「はやぶさ」はイトカワに向かっていったのです。そして、26 日午前 6 時 45 分、高度 40m に達し、7 時 00 分ごろには高度 7m で小惑星表面に正対するような姿勢になりました。その後、毎秒 4cm で表面に接近を開始し、7 時 7 分ごろ表面に接地したときには毎秒 10cm くらいになっていました。接地後、ただちに弾丸が発射され、「はやぶさ」はサンプルを持って飛び立ったのです。（と、そのときは、誰もがそう信じていました。）

図 34 には、タッチダウン時の距離の変化の様子が示されています。また、図 35 には、近距離レーザー距離計の計測値が示されています。まさにタッチダウンが計画された通りに行われたのです。しかし、その後、問題が生じてしまったのです。

降下中の航法用カメラ画像（第2回タッチダウン：11月25日）

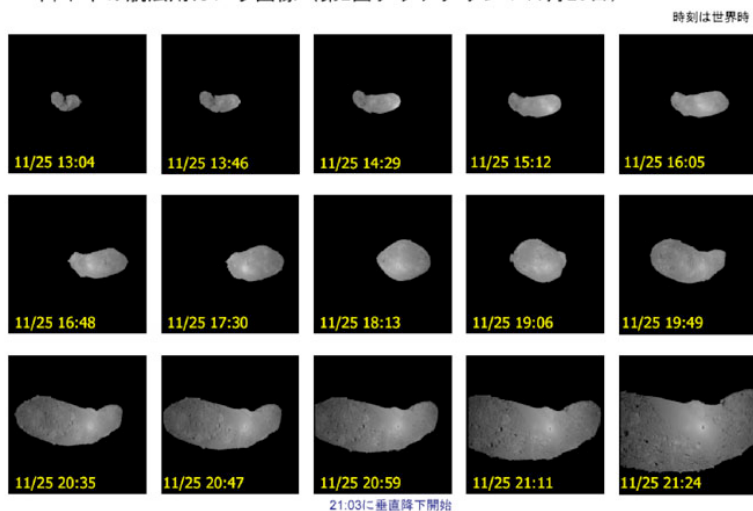


図 33：11 月 25 日から 26 日にかけての小惑星への接近の様子（時刻は、世界時）

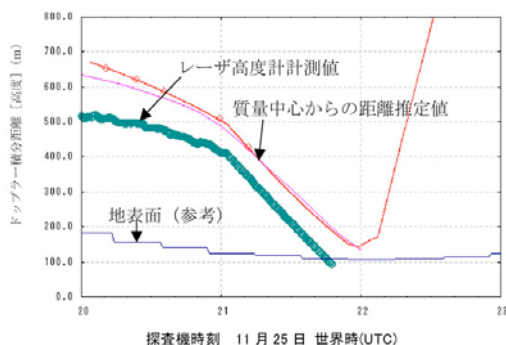


図 34：11 月 26 日のタッチダウン時の距離の変化の様子

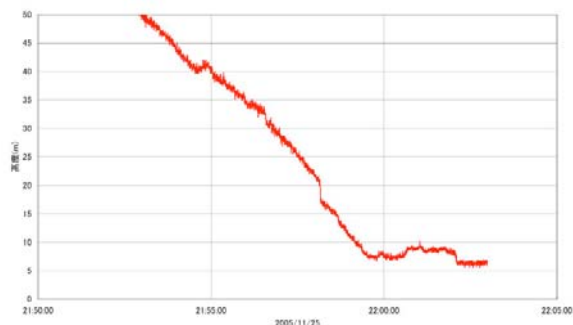


図 35：11 月 26 日のタッチダウン時の近距離レーザー距離計の計測値

<その後>

小惑星から離脱してその上昇速度を減速させる軌道終了が終わった後、燃料漏れが生じてしまいました。燃料の配管にある弁を閉じるなどいろいろな作業を試みたのですが、探査機はうまく制御できるようになりません。燃料漏れが続いているようです。また、漏れた燃料が探査機内で凍ってしまった可能性もあります。それでも、できる限りの手を尽くして、「はやぶさ」の建て直しを試みました。しまいには、イオンエンジンで使う予定のキセノンガスをそのまま噴射して、姿勢の制御を行うことさえ試みたのです。

しかし、残念なことに12月9日以降は、「はやぶさ」からの電波が受からなくなってしまいました。これは、漏れた燃料によるガスの放出が起こって、姿勢異常が生じたためだと思われる。さらに残念なことに、探査機に残っていたデータを調べてみると、タッチダウンの時に弾丸が発射されていない可能性もあることが分かりました。ただし、これは、探査機がこのような異常状態にあるので、必ずしも100%信用できるデータではありません。図36のように、「はやぶさ」が小惑星表面の物質を見事に採取したことを信じたいと思います。

いずれにしても、「はやぶさ」が2007年に地球に戻ってくるためには、12月の半ばまでには小惑星から出発する必要があります。それなのに、「はやぶさ」と通信することすらできません。そこで、帰還のための新しい軌道が検討されました。新しい軌道は、2007年2月にイトカワ軌道から離脱すれば、2010年の6月に地球に戻ってくるというものなのです。ですから、まだ時間はあります。イトカワの姿勢がどちらを向いていても、しばらく待てば、地球と通信ができる向きに来る可能性が高いということも分かりました。ということで、現在（2006年2月）の時点では、「はやぶさ」のいる方向（これは、小惑星イトカワの方向です）にアンテナを向けて、「はや



図36：表面物質を採取する「はやぶさ」（想像図）
イラストは、池下章裕氏による。

ぶさ」を復旧させる作業を続けています。

<挑戦の結果>

この章では、2005年11月に「はやぶさ」が行ったことをまとめてみました。ちょっと長い文章になりましたが、これでもごくわずかのことを述べたに過ぎません。ただ、重要なことは網羅されていると思います。この間、新聞紙上などでは、「はやぶさ」について「失敗」とか「成功」とかの文字が踊っていました。まだミッションが終わったわけではないので、最終的に成功なのか失敗なのかは分かりません。ですが、ここまでのことを成し遂げた「はやぶさ」は、日本の、そして、世界の惑星科学に大きな一歩を印したことは確かだと思います。これを今後の惑星科学そして人類の文化的遺産としてどのように発展させていくのが今後の課題です。

8. イトカワの運命

最後に、簡単に小惑星イトカワについて触れておきます。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ました。太陽に最も近づく近日点距離が0.95天文単位で、太陽から最も遠ざかる遠日点が1.70天文単位です（1天文単位＝約1億5千万km）。つまり、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ことになります。典型的な地球接近天体（NEO）です。イトカワの軌道図を描くと図37のようになります。ここには他の小惑星の位置も描かれています。

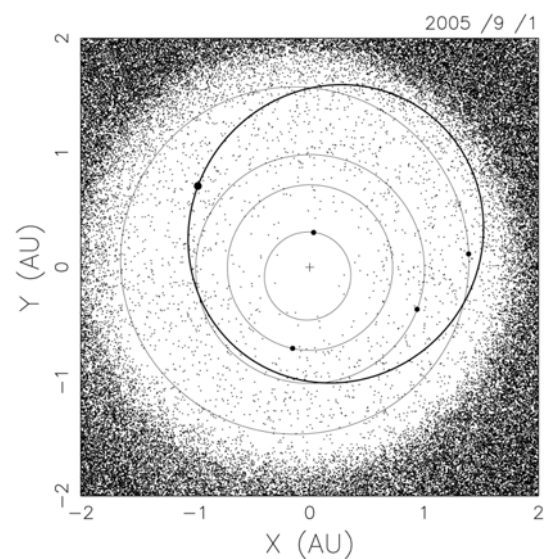


図37：小惑星イトカワの軌道

太い線の軌道が小惑星イトカワの軌道で、その他の軌道は、内側から水星、金星、地球、火星の軌道である。軌道が求められている小惑星の2005年9月1日の位置もプロットされている。

発見された当初は、1998 SF36 という仮符号で呼ばれていましたが、特に「はやぶさ」の探査対象天体となってからは観測が積極的に行われるようになりました。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ました。

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りますが、名前を提案できるのは、その小惑星の発見者です。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 宇宙科学研究本部)からイトカワ (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のです。「イトカワ」の名前の由来は、すでに書きましたように、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んだものです。

さて、イトカワが NEO であるという、その地球衝突が気になります。そこで、イトカワの軌道進化を調べてみました。ここでは詳細は省略し、結論だけを述べますと、次のようになります。まず、イトカワの過去ですが、小惑星帯の内側の縁付近にあった可能性が高いことが分かりました。その軌道は、すぐには地球に接近してこないものでしたが、力学的に特別な状況になって、現在の軌道まで進化してきたのです。そして、未来には、水星から火星までの惑星か太陽に衝突してしまう可能性が高いことも分かりました。これは、典型的な NEO の軌道進化です。ちなみに、地球と衝突する確率を頻度に換算してみると、大体 100 万年に 1 度くらいの頻度になります。もちろん、イトカワの場合、もし衝突してしまえば繰り返して衝突が起こるわけではないのですが、衝突確率を直感的に言うところのこのようなものになるわけです。

100 万年に 1 度の衝突確率ですから、特に心配する必要はないのですが、このことから「はやぶさ」の探査の別の意義が見えてきます。それは、地球に

衝突する天体の素性を知ることです。仮に、遠い将来に小惑星が地球に衝突してくることが分かったとします。そのときに、おそらく人類は手をこまねいて見ているのではなく、何らかの対策を立てて実行するものと思います。天体の衝突問題を扱う活動をスペースガードと言いますが、「はやぶさ」の探査はスペースガードに対しても重要なデータを提供することになるのです。

<スペースガードについてのコメント>

天体の衝突という問題は、単なる脅威ということではなく、地球の歴史を考える上でも重要なテーマになります。例えば、6500 万年前に恐竜を含めて多くの生物種の絶滅が起こりました(図 38)。地質年代が、大きくは中生代から新生代に、細かく言えば白亜紀から第三紀に移り変わったわけです。それまで栄えていた大型の生物である恐竜が姿を消して、主役がほ乳類となりました。この生物界の大転換の原因として、小惑星のような小天体の衝突が絶滅の引きがねになったという説があります。この説では、小惑星が地球に衝突したことによって、地球環境が大きく変化してしまい、恐竜を含む多くの生物種がその変化に耐えられなかったというものです。環境の変化に耐えることができたのがほ乳類などの生物で、その後、繁栄することになりました。

ここでは、スペースガードの詳細は省略しますが、天体が地球に衝突するということは想像するだけでも怖いことです。ですが、ちょっと視点を変えてみましょう。もし、恐竜の絶滅がたった 1 個の小惑星の衝突によって引き起こされたという説が正しいとすると、仮にその衝突が起こらなかったら、現在もまだ恐竜の世界が続いていたかもしれないことになりますね。人類を含むほ乳類は、片隅に追いやられて……。そう考えると、小惑星は人類を地上に誕生させてくれた恩人なのかもしれないのです。でも、今の人類にとっては、小惑星が衝突してくることはやはり脅威です。「人類の危機管理」としても、小惑星をきちんと把握する必要があるのです。



図 38 : 6500 万年前に起こったかもしれないこと (想像図)
イラストは、池下章裕氏による。

再び、星の王子さまへ...

星の王子さまは、地球に来てからちょうど1年後、故郷の小惑星へと帰っていきます。ちょうど1年後に、王子さまが地球に降り立った場所の真上に、王子さまの小惑星がくるからです。物語の詩的な雰囲気を壊してしまって恐縮ですが、これはちょっと設定がおかしいですね。小惑星は地球とは別の公転周期で太陽を回っているのが普通ですから、小惑星が1年後に地球から見て同じ場所に戻ってくることはまずありません。もちろん、地球と同じぴったり1年の公転周期ならばそのようなことはあり得ますが、そうしますと星の王子さまの小惑星は、非常に特別な小惑星ということになります。そして、地球軌道のすぐそばにあることにもなります。つまり、星の王子さまの小惑星は地球に接近してくる NEO だった、ということですね。

すでに述べましたように、小惑星イトカワも地球に接近する NEO の1つです。最近では、2004年6月26日に0.01天文単位（約150万km）まで地球に接近しましたし、その前は2001年3月29日に、0.04天文単位（約600万km）まで地球に接近しました。イトカワの場合には、接近の間隔が3年余りありますから残念ながら星の王子さまの故

郷の小惑星ではなさそうですが、公転周期がほぼ1年の小惑星もいくつか発見されています。そのような小惑星が星の王子さまの小惑星なのかもしれません。

ということは、星の王子さまは意外にも地球の近くにいて、いつも地球を見ているのかもしれません。そして、人類があまりにも身勝手なことばかりしていると、恐竜が滅んだときのように、人類も滅ぶと警告しているのかもしれません。ひょっとして、これが、サン＝テグジュペリが、星の王子さまの故郷として小惑星を選んだ理由なののでしょうか。

物語のなかで王子さまが地球でキツネから学んだことがあります。それは、「心で見なくちゃ、ものごとはよく見えないってことさ。かんじんなことは、目にみえないんだよ。」ということです。現代のように動きの激しい時代においては、この言葉はいっそう重要な意味を持っていると思います。これからを担う若い世代の皆さんには特に認識して欲しい言葉ですし、若くなくても「帽子の中」をわかろうとする心は持ち続けたいですね。

「星があんなに美しいのも、目に見えない花が1つあるからなんだよ……」 星の王子さま



目には見えない大切なもの (C)Akemi Ogura 2005

星星是美丽的，因为那里有一朵看不见的花。

Las estrellas son bellas, por una flor que no se ve...

星があんなに美しいのも、目に見えない花が1つあるからなんだよ……

The stars are beautiful, because of a flower that cannot be seen.

Les étoiles sont belles, à cause d'une fleur que l'on ne voit pas...

Die Sterne sind schön, weil sie an eine Blume erinnern, die man nicht sieht...

Звезды очень красивые, потому что где-то там есть цветок, хоть его и не видно...

帽子の中？

謝辞：

「はやぶさ」のミッションにつきましては、非常に多くの方々から激励の言葉をいただいています。また、様々な場面で、いろいろな方々にサポートしていただきました。運用は非常に大変な場面が多かったですが、皆さまからの暖かい言葉や手助けが励みとなりました。本当にありがとうございました。まだミッションの途中です。「はやぶさ」が地球に戻ってくるまで、頑張っていきたいと思います。

また、この場を借りて、「はやぶさ」ミッションチームのメンバーにも感謝の意を表したいと思います。この文章に書いた「はやぶさ」の成果は、すべて、メンバー各人の奮闘と素晴らしいチームワークの結晶です。このようなミッションに私自身が関わることができた幸運に感謝したいと思います。

そして、若い皆さんへ：

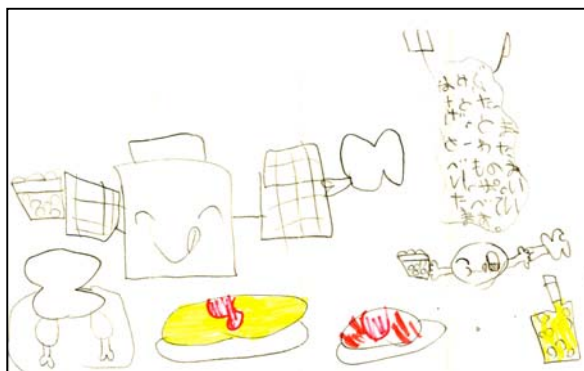
現代という時代は、いろいろな意味でますます大変な時代になってきていますが、是非、皆さんが熱中できるものを見つけ、皆さんの夢に向かって突き進んでいってください。「はやぶさ」のおかげで、久しぶりにワクワクする時間を持つことができましたが、皆さんもきっと同じような体験することができると思います。



「はやぶさ」運用室の外の壁に貼られた多くのメッセージや関連する報道など



あすたむらんど徳島から送られてきた多数の応援メッセージ



秋山小夜さん（6歳）からのイラスト

「はやぶさと たーげっとまーかーわ たべものお いっぱいたべています」と書かれています。

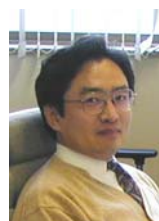


東工大附属高校科学部から送られてきた「はやぶさ」の折り紙とその作り方の説明文

ここに書いた文章は、筆者がこれまで書きたいいくつかの文章をジュニアセッション予稿集用に統合し編集しなおしたものです。

掲載されている「はやぶさ」関連の図は、特に記載がない限り、ISAS/JAXAのWebから引用しています。

2006.02.20



吉川 真
makoto@isas.jaxa.jp

<宿題> -挑戦してみよう-

下の図は、「はやぶさ」がゲートポジションに到着してから 20 日間ほどについて、「はやぶさ」-イトカワの距離の変化を示したものです。縦軸（Range）が距離（km）で、横軸は時間を修正ユリウス日（MJD）で表したものです。修正ユリウス日については、単に日付を表すものと考えてください。MJD=53625 は、2005 年 9 月 12 日に対応します。「はやぶさ」-イトカワの距離は減少していきますが、時々増加に転じているのは、「はやぶさ」が小惑星に近づきすぎないように、小惑星から離れる方向にスラスト（小さなロケットエンジン）で加速しているためです。

スラストによる加速はカーブが折れている点のみで行われていると仮定して、「はやぶさ」が小惑星に引かれている加速度を求めてください。また、求められた加速度が小惑星からの引力のみによると仮定した場合、小惑星の質量はどのくらいになりますか？

注：本文でも述べたように、この図で示されている範囲では、実際には小惑星の引力よりも太陽輻射圧による加速の方が大きいものとなっています。小惑星の引力による加速は、求められた加速度の数パーセント（距離 20km 付近）から数割（距離 7km 付近）に対応します。

