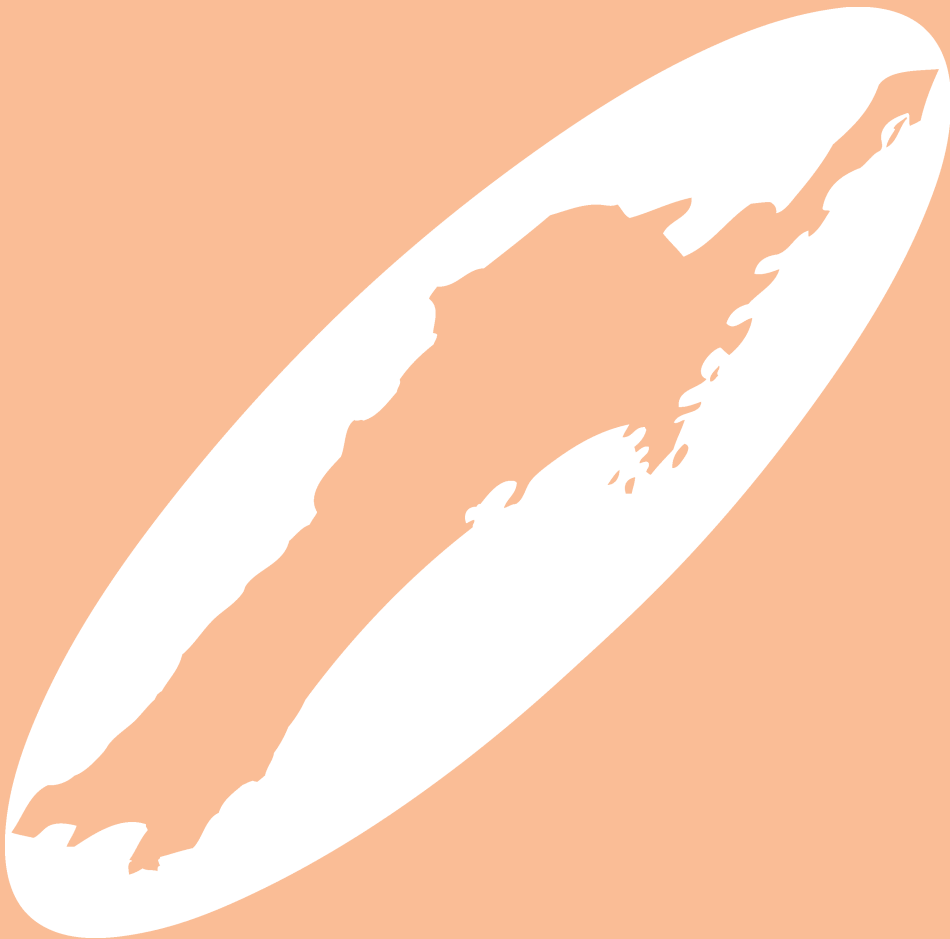


平成22年度 環境シンポジウム

# "小惑星探査機『はやぶさ』 七年間の旅の軌跡"



平成22年度 環境シンポジウム

# "小惑星探査機『はやぶさ』 七年間の旅の軌跡"

と き／平成22年 9月29日（水）

13：20～15：30

ところ／イズミティ21

（仙台市泉文化創造センター）

主催／財団法人 宮城県環境事業公社

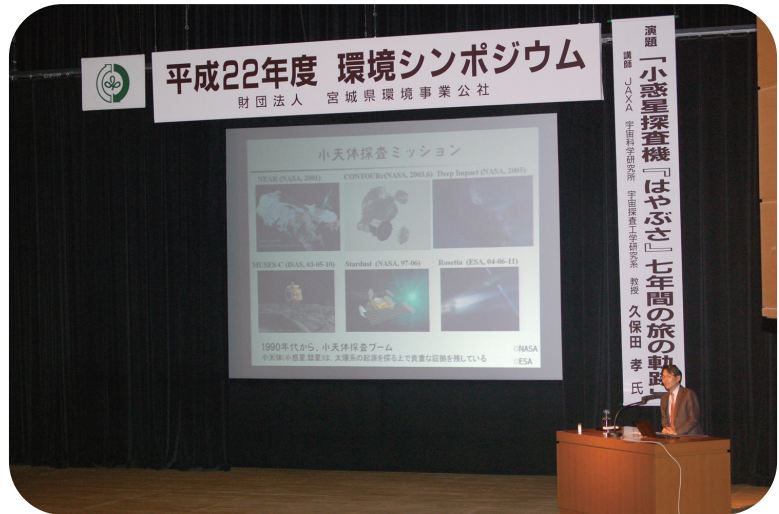
後援／経済産業省東北経済産業局

宮城県

賛助／環境省東北地方環境事務所

# “小惑星探査機『はやぶさ』七年間の旅の軌跡”

平成22年度 環境シンポジウム



## TIME STAGE

- 13 : 20 開 会
- 13 : 20 あいさつ
- 13 : 30 講 演 「小惑星探査機『はやぶさ』七年間の旅の軌跡」
- 15 : 30 閉 会

### 講 演

小惑星探査機『はやぶさ』七年間の旅の軌跡…………… 7

久 保 田 孝 氏

JAXA 宇宙科学研究所 宇宙探査工学研究系 教授

アンケート調査結果……………37



## あ い さ つ

財団法人宮城県環境事業公社  
理事長 小 出 恭

平成22年度の環境シンポジウムの開催にあたりまして一言ご挨拶を申し上げさせていただきます。

本日は大変お忙しい中をこのように多数の方にお集まりをいただきまして心から感謝を申し上げます。また日頃は私ども環境事業公社の事業につきまして特段のご理解ご支援を賜っておりますこと、この場を借りて改めて御礼を申し上げる次第でございます。

さて、今年は大変暑い夏でございました。平均気温を見ますと1898年観測以来、平均気温が一番高くなったということのようでございます。これにつきましてはいろいろと原因等分析をされているようでございますが、いわゆる地球温暖化との関連も議論されているかに聞いております。

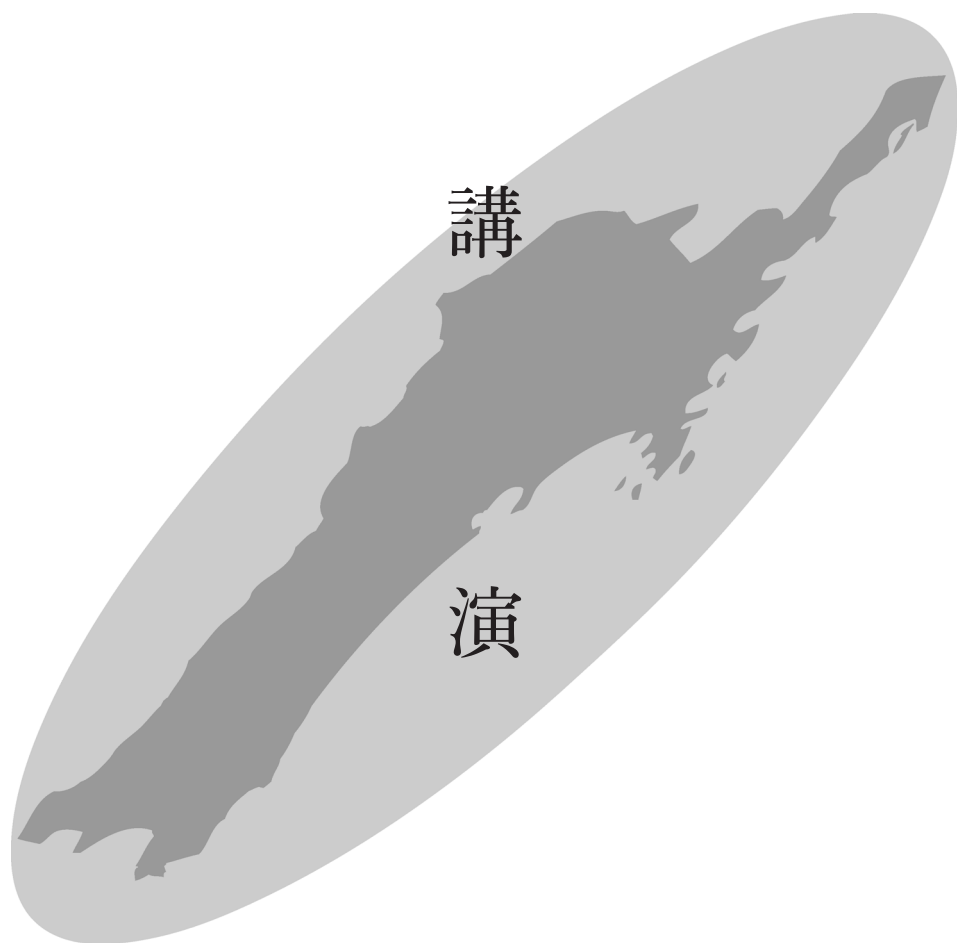
今年2010年は日本が温室効果ガスの排出量を1990年比で6%削減するという、京都議定書第一約束期間のちょうど真ん中の年、三年目でございます。それから国際生物多様性年でもございます。いろいろな面で地球環境問題が脚光を浴びている年でございます。

さて、今年6月に小惑星探査機「はやぶさ」が7年の歳月をかけ、60億キロに及ぶ旅を経て地球に帰還をいたしました。数々のエンジントラブルや交信断絶など、山あり谷ありの冒険を太陽光発電などの省エネ技術で無事に任務を終え、1月以外の天体から帰ってきたのは世界初の快挙でございます。最後は流れ星となって消える姿は日本中が感動を覚えたのではないのでしょうか。

この「はやぶさ」の帰還を可能にいたしましたのは、太陽光発電を活用したイオンエンジンでございまして、宇宙空間という極めて過酷な環境で燃料補給なしに約60億キロ、7年かけて旅をすることが出来たわけでございます。帰還成功は日本が得意とする資源を有効に活用する技術や、省エネ技術の結晶であり、環境に優しい技術が宇宙探査に有効な技術であったことが証明されたものでございます。これを契機に一段と環境に優しい資源循環型社会にふさわしい技術が注目され、私達の暮らしにも大きな影響をあたえるのではないかと考えて、今回の講演を企画した次第であります。

本日はこのようなことから、小惑星探査機「はやぶさ」のプロジェクトに携わられた、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授の久保田孝先生にご講演をお願いしたところでございます。

最後に、大変多忙な中、遠くからこのご講演に駆けつけていただきました久保田先生に衷心から御礼を申し上げますと共に、出席の皆様にも最後までご清聴いただきますようお願い申し上げます。本日は大変ご苦勞さまでございます。ありがとうございました。



小惑星探査機『はやぶさ』七年間の旅の軌跡

JAXA 宇宙科学研究所 宇宙探査工学研究系 教授

久保田 孝 氏

## 講師プロフィール

JAXA 宇宙科学研究所 宇宙探査工学研究系 教授

くほた たかし  
久保田 孝 氏

1986年東京大学電子工学科卒業。1991年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。その後、富士通研究所研究員を経て、1993年文部省宇宙科学研究所入所。現在、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙探査工学研究系教授。同機構、月惑星探査グループ特有バスグループ長、東京大学大学院工学系研究科教授併任。1997～1998年米国NASAジェット推進研究所客員科学者。はやぶさプロジェクトの航法誘道担当。

## 小惑星探査機『はやぶさ』 七年間の旅の軌跡

ご紹介有難うございました。久保田と申します。皆さんこんにちは。このような機会をいただきまして本当に嬉しく思っております。ここ仙台には、実は「はやぶさ」の開発のために何度も来ております。東北大学の工学系になりますが、内山研究室、吉田研究室、高山研究室の皆さんには「はやぶさ」の開発、特にタッチダウンのところや、サンプルを採るところに関していろいろなお協力をいただいております。何度もこちらに足を運んだり、あるいは相模原の方に来ていただいたという経緯があります。仙台は非常にお世話になった地域でございます。宇宙と環境とは非常に関係しておりますので、今日は「はやぶさ」の話を中心に、宇宙と環境について考えていきたいと思います。

今日お話しするのは主に「はやぶさ」ですが、そこで出来てきた、或いは培われてきた技術などを是非、苦勞話なども交えてお話ししたいと思います。質問等も入れまして約2時間、長時間ですがお話を聞いていただいて、20分ほど時間をとりますので、なんなりと質問していただければと思います。

それではスライドを使いまして「はやぶさ」がどのようにやってきたかという話を中心にお話ししたいと思います。

タイトルは、「小惑星探査機「はやぶさ」七年間の旅の軌跡」、キセキという字を「奇跡」と「軌跡」のどちらにするか迷ったのですが、私はかっこのほうの奇跡ではなくて、やはりやるべくしてやったんだとちょっと思う所もありまして、こちらの軌跡にさせていただきました。(図-1)

まずは、小惑星というのは皆さん馴染みがないと思いますが、実は小惑星というのは小さい天体でして、惑星ですから太陽の周りを回っている天体です。いわゆる太陽系の天体で

ありまして、小天体探査ミッションが1990年位から盛んに行われ始めました。小さい天体というのは、実は宇宙が出来た証拠を持っているのです。小さいと暖められてもすぐに冷えてしまう、また重力も小さい。地球のように非常に大きく、重力も大きい天体は、太陽系が出来た時から時間が経つと変形をどんどんしていきます。火山活動もあります。ですから昔の状態は残っていないのですけれども、小さい天体というのは宇宙が出来た、太陽系が出来た時にすぐに冷えて固まったために、昔の情報を持っているわけなのです。物質も変化しませんし、形もいびつなままでそのまま残っている。ですから小さい天体に行くということは、太陽系の始まりを見に行くのと全くの同じということになり、注目されてきました。ところがそういう小さい天体に行く技術というのは実はあまりなくて、ようやく1990年代に出来るようになったころから、探査が盛んに行なわれてきています。

まずは、フライバイ技術といいまして、小天体の近くを通り過ぎる時に観測をするという戦術が、アメリカ中心に行なわれてきました。米国の「スターダスト」ミッションは、彗星に行って近くを通る時

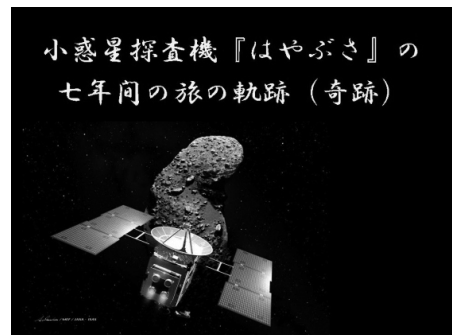


図-1 小惑星探査機「はやぶさ」



に出ているガスを集めて戻ってきたというサンプルリターンです。

それから「ロゼッタ」というミッションは、これも彗星なのですが、ヨーロッパが現在進めており、来年彗星に到達するというふうに聞いております。このように小天体探査ブームというのが、ここ十年二十年行われています。

なぜ小惑星を探査するのかというのは今お話したように、小さいがゆえに昔の情報を持っていますので太陽系の起源を探ることが出来る。これまではNASAはすれ違いざまの撮影しか行なっていなかった。数枚の写真しか得られていないのです。ところが、「ニア」という米国の探査機は実は周回をしました。「ニア」は2000年初頭ですが、小惑星エロスという天体を周回探査しています。小惑星はいびつな形をしている天体ですが、その観測はフライバイでのみ行われたので、今までは数枚しか写真が撮れていません。ですから裏側がどうなっているかというのが全く分からないのです。ところが「ニア」という探査機は、小惑星の周回軌道に入れましたので、裏側を見ることも出来て非常に多くの写真を撮り、観測がされていて天体の分析がかなり行われています。「ニア」探査機が小惑星エロスに到着前にフライバイで観測した「マチルダ」という小惑星がありますが、中がえぐれていて非常に興味深い天体です。しかしながら裏側がどうなっているか判らない。表面は割と滑らかで砂で覆われているのが分かります。ところどころ隕石がぶつかって、表面にクレータが出来ています。こういった小惑星が今まで「はやぶさ」が行く前に得られた情報で、小惑星っていびつな形をしていて、表面が滑らかでクレータがたくさんあるというのが今までの小惑星の常識です。ですからNASAでさえも、こういった天体に着陸してサンプルを採ってこようなんてことは提案がなかったわけです。

軟着陸するというのは、小さい重力で降りるのは結構大変でありまして、ましてやサンプルを採ってくるというのは、彗星は近くを通過することでサンプル採集を行いました。小惑星という固体惑星でサンプルを採ることはやって来なかったのです。そういう例がなかった。表面のサンプルをもし採ってくる事が出来るとすると地上の装置でいろいろな分析ができます。例えば質量分析装置というのがあります。年代を測定出来るのですが、何十kg、何百kgという重さのもので持っていくことが出来ない。ですからサンプルをもし地球に持って帰ってくる事が出来ると宇宙の謎を解明する分析がたくさん出来るということで注目をされていたわけです。こういったことを背景に、日本はどのような探査を進めるべきかということで、やはり究極のサンプルリターンミッションをやろうというのを考えてきました。これがスタートしたのは実は1985年です。25年前に計画がありました。小研究会をつくって小惑星アンテロスに行こうということで提案書をまとめたそうです。しかしながら、当時の技術では時期尚早であるということでプロジェクトにはなりません。

しかしながら、科学者はやはり小惑星に行ってサンプルを採りたいということで、研究会を熱心に重ねまして提案をまとめていったのですが、小さい天体に行くだけでも大変なのです。その天体に着陸してサンプルを採って地球に戻って帰ってくるというのはまだまだ難しい技術でありまして、ある意味工学技術なのです。それを実証しない限り難しいということで、宇宙科学研究所の工学委員会のもとに検討グループを作って検討を重ねて、今から15年前、1995年に工学ミッションとしてスタートしました。コードネームはMUSES-Cという名前です。MUSESというのは工学実験という意味があるのですが、

CということでABCの三番目の工学ミッションで承認をされまして、スタートしたのが実は14年前の1996年にこのMUSES-C、今は「はやぶさ」と言っていますけれど、プロジェクトがスタートしたわけです。

当時の評判はどうだったかと言いますと、いろいろな方からご意見をいただいたのですが「チャレンジ過ぎる」という言葉が一番多くありました。宇宙開発委員会でもチャレンジングなミッションですねというコメントを頂いておまして、当時日本は着陸はやったことがないのです。ですから、そういうミッションは非常にチャレンジングな技術が多すぎるというふうに言われていました。勿論これは日本初であり且つ世界初、人類初の挑戦なのです。そういう認識は十分あったのですけれども、やはり高い目標を立てて挑戦しなくてはその先に進めないというのがスタッフ一同考えていたことで、そういうご批判を受けながらも国が認めてくれて1996年にMUSES-C、今で言う「はやぶさ」ミッションがスタートしたというのが経緯でございます。

技術についてはホームページ等に出しておりますので、ここではちょっと簡単にお話しますと、宇宙空間を航行して小惑星に行ってしかもサンプルを採って戻ってくるという技術です。必要な技術がここに5つ書いております。(図-2)一番目は電気推進技術です。日本のロケットで遠い天体に行けなくはないのですが、帰ってくる燃料はない。或いは搭載できる観測機の重量というのはなかなか多くは持てない。ですから新しいエンジンを開発して効率の良い運転をしないと遠くの天体に行って帰ってくるというのは出来ませんでしたので、イオンエンジンという技術を開発しました。その実証試験をしようということがMUSES-Cの一つの目標です。

二番目は、エンジンだけではなくて地球或いは月の重力を使って加速して燃料を助けようというスイングバイ技術というのを既に実は持っておりまして、電気推進を使ったスイングバイというのも実際に地球を使って行ないました。これでかなり燃料が助かっております。

三番目は小さい天体に行って着陸するという航法誘導技術です。特に新宇宙、月よりも遠いところでは往復の伝搬遅延時間がかかります。「イトカワ」の場合は伝搬時間が約30分かかります。小惑星表面の近くに行った時に地球から支援するというのは出来ませんので、自分で考えて動く、そういう探査機を作りました。

四番目はサンプル採取です。表面が実はどうなっているかというのは行って見ないと判らないのです。金属のように固いかもしれないし、表面がスカスカかもしれない。或いは砂で覆われているかもしれない。そういった所でサンプルをどうやって採るかというのが大きな技術課題でした。

五番目は、リエントリ技術で、採ったサンプルを持って地球に戻ってくる時に大気圏に突入します。表面温度が空気の摩擦で3000度位になると言われています。3000度になるようなものを地球に持って帰ってくるというのは、そういう技術がないと出来ませんので、熱シールド技術が非常に重要になります。我々JAXAではそういう技術がありませんでしたので、それも新しい技術ということになりましてこ



図-2 はやぶさの探査技術

れが主な技術開発要素です。

実はそれ以外に新しい技術をたくさん使っています。一つご紹介しますと、リチウムイオン電池を世界で初めて宇宙で使いました。バッテリーはどうしても持っていかなくてはいけなかったのですが、その当時、宇宙で使えるバッテリーって非常に重かったのです。当時リチウムイオン電池というのが使われ始めた当初でありまして、それを積極的に使おうということになりました。メーカーの方にご協力いただいて宇宙で使える電池に仕上げています。リチウムイオン電池のこれが走りかなと思っております。今、ご家庭なり自動車で使われるようになってはいますが、宇宙で使われた技術の成果が活かされている分野かなというふうにも思っております。

それ以外に高速通信技術などがあります。また、もう一つは先ほど紹介しましたように電気推進というのは電気で動きますのでかなりの電力を必要とします。だいたい2kw位。大きい太陽電池はそんなに持っていきませんでした。効率の良い太陽電池というのを作らなくてはいけない。ここではマルチジャンクションを使った、特にトリプルにクロスさせた太陽電池というのを開発しました。高効率の太陽電池を宇宙に持って行って電力としたというのも大きな技術であります。いろいろな技術が実はこの「はやぶさ」で使われております。あとでちょっと具体的に紹介したいと思います。

これはミッションの最初の想像図でありまして、スタートしたのが1996年です。(図-3) 実はロケットの失敗が続きまして打ち上げ時期を延ばさざるを得なかったというのがありました。打ち上げ時期を延ばすとその天体に行けなくなってしまうのです。そのため1996年にスタートしたのですが、打ち上げ時期が2003年になりましたので対象天体を探さなくてはいけなくなった。それでめざす天体が1998年に見つかった1989SF36という小惑星に行くことに決まりました。ですから、計画当初には見つかっていなかった小天体に実は行くことになったのです。小惑星の当時の想像図はこんな形です。地上からはなかなか観測出来ないの、殆



図-3 計画当初の想像図

んど点ですから、いままで観測された小惑星から、こんな小惑星かな、表面は砂で覆われていて表面にクレータがある。それで大きさは思ったより小さいだろうというのは想像してありまして、設計段階では直径が1kmから10kmではないかなと考えておりました。自転時間は4時間から20時間位ではないかなということで設計をしました。そういった天体に降り、サンプルを採る設計を進めていって、打ち上げが2003年、2年かけて小惑星に到達して当初の予定では2007年、ですからトータル4年のミッションということで計画しておりました。ご存知の通りトラブルがありまして今年の6月に戻ってきたということでございます。

ひとつ、ここでちょっとお話ししたいのは、1996年にスタートしまして、探査機を設計して2003年に打ち上げるというのを1998年頃発表しましたら、実はNASAは、当時「ニア」という小惑星エロスの周回衛星を打ち上げていたのですね。この小惑星エロスの周りを回っていた「ニア」という探査機はミッションが終わりましたらジェットを吹いて別の天体に行って観測するというオプション計画を立ててい

たのですが、日本が「はやぶさ」ミッションをやるという提案をして着々と開発しているということを知った途端に、オプションミッションを変えてきました。アメリカという国はとにかく何でもNo.1じゃないといけないのです。特に宇宙の分野ではNo.1でなくてはいけないという自負があります。日本が多分上手いかないだろうが、まさか小惑星に行って世界で一番に着地するなんてことは許されなかったわけです。ですから何をしたかと言いますと、「ニア」の探査機をわざわざ小惑星エロスに降ろしました。我々スタッフは非常にびっくりしたのですけれど。と言いますのも「ニア」は別の天体に行く予定でしたから、着陸用の準備は全く持っていないのです。着陸用の高度を計るセンサや、着陸したあとに通信するようなアンテナの配置というのは全く持っていなかったのです。ですから我々はブラインドハードランディングというふうに呼んでいるのですけれど、目をつぶったまま小惑星にぶつかったミッションであると言っています。「ニア」のミッションで降下中に撮った画像で高度200mまでの画像が公開されています。当時、私はアメリカに行っていました、このミッションを見ていました。時々刻々高度が下がっているのが分かりました。これは高度計ではなくて電波のドップラーというのを使いまして大体の距離が分かります。どんどん高度が下がって行って、ぶつかった頃にはクラッシュして通信が途絶えるだろうというふうに予測していたのですが、不幸というか幸いといえますか、この「ニア」という探査機はぶつかった時にも電波が来ていまして、ようするに生きていますよという電波が来たのです。これはエロスという小惑星がご覧の通り砂で覆われていたのでクッションのように、速度2 m/secでぶつかったと聞いていますが壊れずに生き残っていた。ただし着陸を考えていませんでしたから電波は来るのですけれども、データは全く来なかったと聞いてます。彼らは世界で初めて小惑星に着陸したと報道していますが、私から見るとブラインドハードランディングをしたのだなというふうに思っております。もちろん、やはり惑星探査の分野ではアメリカが1歩も2歩も進んでいます。日本はまだまだです。ただし、こういうMUSES-Cというミッションを立ち上げて開発して打ち上げる準備を進めている中で、アメリカもようやく日本を意識してくれたのかなと感じたということで、ちょっと紹介させていただきました。

以降ちょっと具体的な話をしていきますが、2003年5月9日、鹿児島県の内之浦という所でM-Vロケット5号機で打ち上げました。これが探査機の写真ですが、人間が写っているように大体1m位の大きさと重量が510kg。惑星探査としては非常に小型な探査機です。(図-4) 太陽電池は畳んだ状態です。サンプルを採るメカニズムも畳んだ状態でロケットの上部、フェアリングの中に納めて打ち上げを行いました。

「はやぶさ」という名前は、最初はMUSES-Cというコードネームで呼ばれていました。打ち上げが終わって軌道に乗ったのを確認してから名前を付けるというのが宇宙科学研究所の当時のやり方でありまして、一般公募もしていませんでした。実験班から名前を募集しまして命名委員会で決定して軌道に乗ったら正式発表するというやり方を当時行っていました。当時有力だった候補は「ATOM」アトムです。鉄



図-4 はやぶさ探査機

## “小惑星探査機『はやぶさ』七年間の旅の軌跡”

腕アトムから取ったというふうに言われているのですが、アステロイド テイクアウト ミッション (Asteroid Take-Out Mission) という略でATOMですね。いろいろな議論があったのですが、サンプルを採るという行為がいかにも鳥の隼のようにサーッと近づいて行って取ったらすぐに飛び上がるという、そういうやり方でしたので、最終的には「はやぶさ」という名前に決まりました。関連するところでは鹿児島県に特急はやぶさというのが当時通っておりましたし、鹿児島県の地名に隼人というのがありまして、いろいろな意味から「はやぶさ」という名前に決めようということで最終的になったわけです。漢字で書くと「隼」こういう字です。見ての通り、何となくサンパホーンがあって太陽電池が広がっているようなイメージをちょっと持つかなと後でこじつけに私なりに言っているのです。もう一つは糸川先生、ロケットを開発した先生ですが、軍用機の隼というのも設計した先生で、「イトカワ」と「はやぶさ」の関係というのも、これは後からなのですけれど出てきたしだいです。当時はMUSES-C、打ち上がってから「はやぶさ」という名前、皆様には「はやぶさ」という名前が親しまれたかなと思っております。

これが「はやぶさ」の全体図です。(図-5) これは太陽電池で、1 AUというのは太陽と地球の距離ですけれど、2.6 kwの発電が出来ます。大きさは6 mちょっと。高さが3 m弱とそんなに大きいものではございませんので、この建物には十分入る大きさでございます。非常に効率のいい太陽電池を開発して宇宙で使えるものを作ったというのは非常に大きい功績でございます。

もう一つは、推進機器が化学燃料。これはヒドラジンですけれど化学燃料を燃やすというものと、もう一つ、電気推進という技術を使いましてキセノンガスを触媒と使っております。もしこの触媒を使った電気推進がなければこの燃料が10倍位必要で載らないわけです。ですから電気推進技術が非常に重要で化学燃料とこのキセノンガスを使って大体重量が130kg位ですから「はやぶさ」のトータル重量の1/4が燃料なのです。こういった電気推進と化学燃料を両方使えたというのが非常に大きいものでありまして、今で言うハイブリットカーみたいなものです。ガンリンと電気動く様なそういう「はやぶさ」を作り上げました。

ハイゲインアンテナがここにありまして地球の指向精度が1度以下に指向しないとイケません。ただし熱の問題もありまして、大きい電力は扱えませんので最大の通信レートが8 kbpsでした。ハイゲインアンテナながら、低速なビットレートのアンテナを持っていきました。ここにあるのはサンパホーンというサンプルを採る装置でございます。これは下面から見たものでいろんな機器が下についています。太陽と地球がだいたい同じ方向にありますのでアンテナを地球に、太陽電池を太陽に向けながら降りて行きます。こちら側にある機器は小惑星を見る機器でありましていろんなセンサが付いています。あとで紹介したいと思います。(図-6)

探査機の形はちょっと変な形に見えるのですが、実はいろいろ工夫されて考えた形状になっております。太陽の方向に対してイオンエンジン、電気推進が垂直についています。これは太陽系探査で地球か

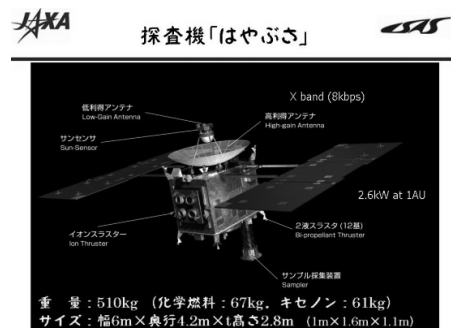


図-5 はやぶさの全体図

ら外に出る時にはこういう垂直方向に作ることによって効率よく航行出来るわけです。サンプラホーンなどいろいろと考えた末の設計になっているわけです。

当時、日本の惑星探査がどういう状況だったかと言いますと、1985年にハレー彗星が来た時にそれを観測する探査機を打ち上げました。また先ほど言いました重力を使って加速するスイングバイ技術を「ひてん」という探査機で実験を行いました。それから1998年には火星周回探査機「のぞみ」を打ち上げました。「のぞみ」は残念ながら故障がありまして、周回できなかったのですが、そういう現状でアメリカに先駆けてサンプルリターンをするというのは考えられなかったわけです。当時はアメリカが1997年に火星に着陸してロボットを動かすというようなことを行っていた時代で、とにかく惑星探査はアメリカの独壇場でした。そういう中で日本はどのようにして、或いはどうやって小惑星探査を可能にしたのかというのをよく聞かれまして、私なりの考えでは大きな理由は五つあったのではないかなと思っています。これからその理由についてご紹介したいと思います。

一番目の理由。実は一番重要なと私なりに思っている事ですが、日本のロケットでとにかく行きやすい、行ける探査対象の小惑星を見つけたというのが非常に大きい理由の一つかと思っています。これは、中心に太陽がありまして、ここが火星の軌道で、ここが木星の軌道です。火星と木星の軌道の間には、小惑星というのは何十万とあると聞いています。(図-7) 数十メートルから数百kmという大きさの小惑星が火星と木星の軌道にたくさんあるのがわかっております。こういうところに行くというのは実は日本のロケットでは非常に厳しいのです。行けなくはないのですが、燃料を非常に使う。ところが、この小惑星の中には非常に気まぐれな小惑星がありまして、太陽の周りを大きな楕円軌道を描く、そういう小惑星があります。とすると、時々地球に近づく小惑星があるわけです。そういう

近地球型の小惑星というのを一生懸命探して、行きやすい小惑星を見つけたというのが「はやぶさ」の成功の第一の理由ではないかと思っています。

二番目は、先ほど言いましたようにハイブリットの探査機エンジンを作ったというのが大きいことです。電気推進を使いまして化学燃料よりも10倍燃費のいいエンジンを開発した。(図-8) これは1980年代から宇宙研のグループがメーカの方と協力して開発していったもので、イオンエンジンという



探査機「はやぶさ」

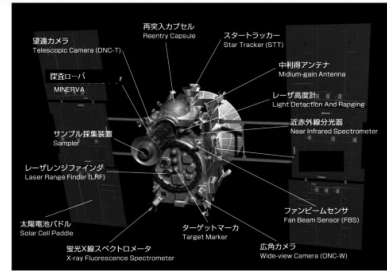


図-6 はやぶさ探査機



日本はどのようにして  
小惑星探査を可能にしたのでしょうか？



1. 行きやすい小惑星を見つけた。  
楕円軌道で地球に近づく近地球型小惑星  
小惑星イトカワ(1998SF36)の軌道がわかったのは1998年！

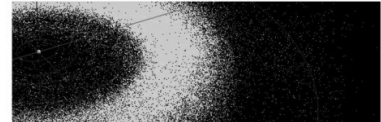


図-7 近地球型小惑星



日本はどのようにして  
小惑星探査を可能にしたのでしょうか？



2. 10倍燃費の良いイオンエンジンを開発した。  
惑星探査機はほとんどが燃料タンク。観測機器を積みめない。

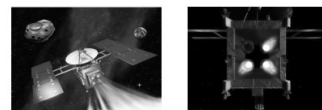


図-8 イオンエンジン

ふうに言います。原理をちょっとご紹介しますが、この(図-9)は子供達に分かり易くするために作ったスライドです。宇宙空間で前に進む、要するに推進するためには非常に簡単でありまして、ものを何か外に出せば反対方向に進むという運動量保存則というのが成り立つ世界です。ですから重いものを外に出せばそれだけ速く動き、同じ重さのものでもより速い速度で外に出せば多く加速します。ですから効率のいいエンジンというのは、重いものを速く外に出せれば、効率の良いエンジンが作れるということになります。ここで、電気推進のメカニズムをちょっとご紹介します。

(図-10)これが推進を作るところでございまして、プラズマという状態を作ります。気体をプラズマ状態、すなわちプラスとマイナスに電離させる。その時に使う触媒がキセノンガスでありまして、こういうプラズマ状態にするのに、いろいろな方法があります。アメリカも実は似たような電気推進エンジンを開発していますが、日本が開発したのはマイクロ波を使ったプラズマ化です。マイクロラスターというのですけれど、いわゆる電子レンジを使ってキセノンガスをイオン状態、プラズマ状態にしまして、プラスとマイナスに分離させます。ここに電極、グリッドを使ってマイナスの電極をた

たてて電位差を与えると勿論、プラスのイオンが右方向に、マイナス電極に向かって移動するわけです。その移動をそのまま通過するようにすると、イオンを外に出すことができます。勿論、質量は非常に軽いのですが、ここに高電圧をかけると電位差に応じて加速されます。どの位加速出来るかというかといいますと、30km/sec。1秒間に30kmという非常に速い加速が得られます。そのために質量は小さいのですが、速度がものすごく速ければそれなりの力を得るわけです。ただし、外に出たプラスイオンをそのままにしますと、探査機側がマイナスに帯電していきます。そうするとせっかく出したプラスのイオンがマイナスに引きよせられて、加速度が落ちるという現象が起こります。そのためにもう一つ、中和器というのがあります。この中和器というのは、ここで発生したマイナスイオンを出口で出すと、プラスとマイナスに中和されて電荷されていないものが外に出る。そうすると帯電されませんし、元に戻ってこない。ですからイオン源と中和器というのを組み合わせてものを外に出す、高速に出すというやり方が電気推進の非常に簡単な説明でございまして。こういうことによって推力はそんなに大きくないのですが、それなりの力を出すことができます。どの位出せるかといいますと約10mN。10mNというのはそうですね、1円玉位をちょっと押す力です。ですから非常に弱いのですが、これを長時間継続すると大きな加速度を得ることが出来ます。要するに積分効果で出来ることになりまして、いわゆる継続は力なりでイオンエンジンというのは宇宙空間では非常に効率のいいものです。必要なものはキセノンガスです。あとは電気さえあれば出来るわけです。ただし電極を使ってい



図-9 推進システム

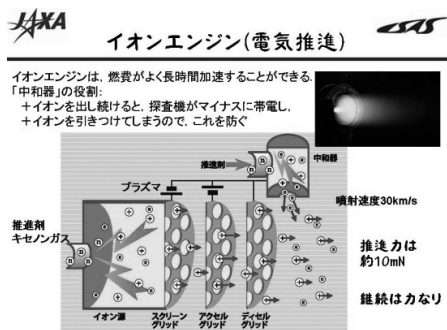


図-10 イオンエンジンの原理

ますから、勿論劣化等も起こってきます。寿命というものがありますが、マイクロ波を使ったやり方というのが、実はその中でも長寿命化されたというものです。世界で優れたイオンエンジンというふうに言われているのはそういう理由でございます。こういうエンジンを開発したというのは非常に大きなものでございます。とにかく電気を使って化学エンジンだけではなくて、効率のいいエンジンを開発することによって全体の重量が減ったということと、遠くに行く技術を得られる。そういう意味でこれは非常に成功した理由の二つ目でございます。

あと三つあります。三つ目は小さい天体に行く技術です。通常、探査機というのは地球から誘導していきます。電波を使いまして往復の伝搬時間とドップラーを使いますと、探査機の位置が大体判ります。精度で言いますと、大体100km位の誤差をもって探査機の位置が判ります。小惑星というのは軌道が判っているのですが、これも誤差が100km位あります。ですからトータルで200km或いは300kmの誤差をもって相対的な位置がわかります。小惑星は大体数km位かなと思っていましたから、実は地球からの誘導では探査機を小惑星に導くことは出来なかったわけです。そのために新しい技術を作りました。

探査機はサンプルを採る地点を見つけて、そこに降りて行ってサンプルを採るということをやります。しかしながら、一番大きな問題は着陸の時に横方向速度をどうキャンセルするかです。小惑星というのは自転しているだろうと思っていましたから、着陸して表面を触ってサンプルを採るのですが、触った瞬間に横方向速度が大きいと叩かれて探査機が倒れてしまうので、横方向速度をどのように検出してキャンセルするかというのが実は大きな問題でした。

さらにもう一つは、小惑星の大きさは最低でも1kmかなと思っていて、着陸航法誘導制御が大体60m位というのを想定していました。今まで見てきた小惑星を見ると、安全なところが結構数百メートル位あったわけです。ですから、「イトカワ」も直径1km位で、せいぜい100m位の安全な所はあるだろうと設計していたわけです。しかし実際に行ってみるとサイズがその半分の500m、着陸出来そうな所は、30m~40mしかなかったのです。ですから行ってみて判ったのですが、当時8cm/sec位に抑えたいと思っていた相対速度が、実は1cm/sec位に抑えないと安全な所に誘導出来ないというのが分かりました。最終的には高精度着陸という技術をマスターすることに結果としてなったわけです。

ちょっと具体的に紹介しますと、地球から電波を使って往復の伝搬時間とドップラーで位置が判るのですが、それだけではこの「イトカワ」に到達出来ませんので、ある程度距離が近くなったら、だいたい数千km位からこの「イトカワ」が判りますので、搭載のカメラから画像を撮って「イトカワ」を見つけてということを行います。これを光学航法と言うのですが、1万kmの距離から「イトカワ」の明るさで検出が出来て、数千kmに近づいてより判る、そのために搭載のコンピュータの画像を使ってナビゲーションをするという光学航法を考えました。これは新しい技術です。ただし勿論オンボードではなくてその画像を地球に降ろして判断を行いました。具体的にちょっとお見せしますと、これが実際に「はやぶさ」が撮った「イトカワ」の方向の写真です。(図-11)

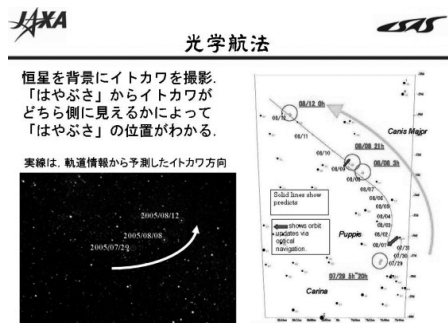


図-11 光学航法



たくさん背景に星があります。この中からターゲットの「イトカワ」を見つけるというのは結構大変なのです。私も見たのですが、どれが「イトカワ」なのか全く判りませんでした。一枚の写真だと判らないのですが、時間が経った後に何枚か撮りますと、遠くの星は同じ位置にあるのですが、「はやぶさ」が動くことによって「イトカワ」は比較的近くにありますが動いて見えるのです。実は探査機が全く「イトカワ」の中心に向かって正確に進んでいたら判らないのですが、ちょっとでも斜めに移動していれば動きで判ります。ただし数時間の移動では私は判らなくて、天文学者がこれが「イトカワ」だと見つけてくれました。それで日にちを変えて撮った写真を見ると確かに動いて見えるのです。これがまさしく「イトカワ」だということで、この「イトカワ」の星が真ん中になるようにエンジンを使って、この時は化学エンジンですが、ジェットを吹いて姿勢を立て直して向かったというのが2005年の8月に行なったことでございます。

もう一つ、横方向速度をどうキャンセルするか。私はロボットビジョンを専門としていましたので、画像処理を使って横方向速度を検出するというオプティカルフロー技術というのがあるのですが、それを使う提案をしましてそれも搭載しました。しかし同僚から「もしかしたら「イトカワ」って明るい星かも知れない。行ってみるとほとんど真っ白かも知れない」と言われました。「真っ白でも画像処理は出来るんですかね」と聞かれた時、正直に「真っ白だったら出来ません」と答えたわけです。そうすると万が一のために何か目印を落として、それをナビゲーションに使ったらどうかという提案がありました。物を落として目印とするという、いわゆる人工的なマーカを落としてナビゲーションをするというアイデアです。もちろんそういう技術は出来るわけで、ただし物を落とす時に跳ね返ってきってしまうと困るわけです。我々が住んでいる世界は重力が大きいところですので、物を落とすと跳ね返ってこないわけですが、「イトカワ」のように小さい天体というのは重力が1万分の1とか10万分の1です。そうすると何か物を落とした時に跳ね返ってきってしまうのです。それで色々な案がありました。ペンキを落としたらどうかという案もあったのですが、液体を落とすと微小重力下では実はその液体って球状になりまして、ヌレ性がないとまた戻ってきってしまうのです。いろいろな方向に飛び散ってしまう。電波源を落としたらとかいろいろな案がありまして、最終的にはちょっと面白いのですけれど、ボールの中にビーズを入れてこれを落とすと反発係数が小さいということが判りました。何を応用したかと言うと、「お手玉」です。お手玉を壁にぶつくと実は跳ね返って来ない。原理は中にある小豆がぶつかった瞬間に多重衝突して熱に変わるという原理です。熱に変わるということは、エネルギーが失われているわけですから、運動エネルギーも減るわけです。ですから反発係数が小さくなる。非常にシンプルな原理でありまして、小豆を入れるわけにはいきませんので、ビーズを入れて試験をしました。それでこういうターゲットマーカを作ったわけです。(図-12) もう一つは、このターゲットマーカのまわりにこのような反射シートを巻いています。



図-12 ターゲットマーカ

太陽光が当たっていてもターゲットマーカが判るようにフラッシュをたいて、フラッシュオフの時とオ

ンの時の画像の差分をとってターゲットマーカを見つけるということに最終的になりました。反射シートにはリフレクタというのが付いていまして、光が来た方向にそのまま返すのです。工事現場で夜間、作業員が使っている反射シートと全く同じ原理でございまして、そういったものを付けてちょっと面白いやり方ですが、確実に判るようなシステムを作って、この中に88万人の署名を入れて持って行ったわけです。この中に自分の名前が入っているという人いますか？ 十数年前に募集しまして「星の王子様キャンペーン」ということで皆さんの名前を小惑星に持って行くということを行ないましたところ、88万人の方から署名を頂いてこのフィルムに載せたものです。原理は非常に簡単ですが、中の充填量や内容物をどうするかとか大きさとかいろいろパラメータを振って実験をしました。ちょっと実験の結果を一つお見せしますが、無重力実験というのを行いました。ターゲットマーカに似せたもので、中が見えるように透明な容器で作っています。中にビーズ、ビーズと言ってもこの時はガラスビーズを入れましたが、中がつるつるだと摩擦熱が起きませんので、摩擦の大きいものを入れようと考えました。最終的にはポリミドという宇宙でも使える物を中に入れてあります。上から下に落とす時に無重力状態で、無重力といっても重力がゼロではないのですけれども、そういう状況下で反発係数が小さいもの、そのためにはどの位の大きさのものを入れて、どの位の量を入れればいいのか、満タンにすると勿論反発係数は大きいわけです。中のものが動いてぶつかるというのが重要



## 低反発性試験

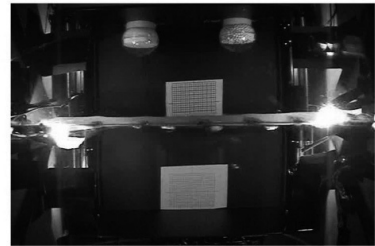


図-13 低反発試験

ちょっと実験結果をお見せしますと、(映像を流している)(図-13) こんな形で、下のものは反発係数が大きい、上のものは上手くいきまして、こういった試験を重ねて理論的考察を含めて低反発なものを使ってターゲットマーカを作りました。ターゲットマークを見ることによって横方向速度がわかって、表面にならいうがら着陸することが出来るようになったのです。

四つ目の理由は先ほど言いましたように、表面が硬いか柔らかいか判らない。それでどうやってサンプルを採るか。最初に提案されたのがトリモチ方式です。紐を伸ばして行って表面に粘着性のあるものを置けば、何らかのものが採れるのではないかというアイデアでした。しかし宇宙空間で粘着のあるものというのは、結構高分子材で作られていまして、宇宙に行くとボロボロになってしまうのです。それから掃除機を持っていったらどうかか、マニピレータでサンプルを採ったらどうかか、いろいろなアイデアがありました。しかしながら、確実に且つ信頼性高く、更に重量の或いは電力のかからないものということから、最終的には硬い場合でも金属だったらダメなのですが、硬い岩石だったら採れるであろうということで、小惑星表面に弾丸を撃ち込んで壊して採るというやり方を開発しました。(図-14) ちょっとビデオでご覧い



## サンプル採取メカニズム

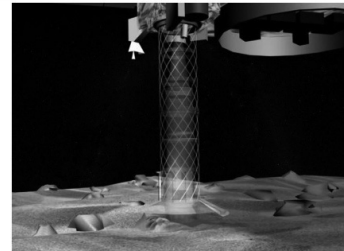


図-14 サンプル採取方法

ただこれだけと思うのですが、根元から弾丸が出てきます。分かり易くスローにしていますが、実際には秒速300mの速さで弾丸を撃ち込んで何か巻き上がってきた物を回収するというやり方で開発をしてきて、これが新しく開発した方式です。

最後に、もう一つの理由は、サンプルを地球に持って帰って来なくては行けませんので、秒速12kmで大気圏に突入しても燃えないように熱に対して強い材質のカプセルを作りました。(図-15) これは熱シールドというもので、耐熱材で出来ています。熱をどうやって大気圏に入った時に逃がすかという、そういう設計をして開発したものです。

以上、4つの主な技術を開発、また、行きやすい小惑星を見つけたことによって、「はやぶさ」が地球に戻る事ができたと思っているしだいです。

「はやぶさ」のミッションシーケンスをビデオで紹介します。地球を出発したのが2003年の5月です。地球を飛び立ちますとまず太陽電池、それからサンバラホーンを展開します。とにかく動くものは、まず最初に展開をします。そのあとにイオンエンジンを点火するわけです。これはイオンエンジンです。こんなに早くは加速しませんけれど、4つあるうちの3つないし2つを使って小惑星に向かいます。その前に地球に一旦戻って来て、地球の重力を使って加速をします。その加速を使って打ち上げから2年後にこの「イトカワ」に到着します。近くまで行きましたら、イオンエンジンは止めて化学エンジン、ヒドラジンを使って徐々に微調整を行なって、小惑星に近づきます。小惑星の重力圏外である20kmで最初に滞在して、グローバルマッピングという小惑星の形状や重力などを推定します。形から安全な場所を探すという、そういうマッピングということを行なって、そのあとに着陸をします。着陸する時に先ほど言いましたターゲットマーカを落とします。他のセンサを使い距離を測りながら、また、表面の地形の傾斜を測りながら降りて行くわけです。降りる前に実は「ミネルバ」という小さいロボットを落とす予定でありまして、表面の探査もしようということを考えていました。表面にタッチした瞬間に弾丸を打って、すぐジェットを吹いて離れるという、表面に滞在している時間はわずか数秒です。それで舞い上がってきたサンプルを上の方に回収出来たら、蓋をしてカプセルの中に収めるというそういうシーケンスを考えていました。「ミネルバ」はびよんびよん跳ねながらいろいろな所を探査して、詳細な画像と表面の温度を計って「はやぶさ」経由で地球にデータを送るという計画でございました。「はやぶさ」は、2年かけて、また地球に戻って来るわけです。

地球に戻って来るとカプセルを分離するわけです。分離する時は火工品とバネを使って回転をさせながら地球に落とします。このあと「はやぶさ」はジェットを吹いて別の天体に行くという計画でした。大気圏に突入しまして相当熱せられますけれども、大気圏への突入が終わったらパラシュートを開いて、オーストラリアの砂漠の上に落とします。実際には夜落としたのですが、ビデオで夜だと全く真っ暗で何も見えないので、打ち上げ前に作った紹介ビデオですが、明るくしました。

探査機「はやぶさ」というのは、実はロボット探査機と言うことができます。いろいろなセンサを使っ

### JAXA 日本はどのようにして 小惑星探査を可能にしたのでしょうか?

5. サンプルを地球に持ち帰るカプセルを開発した  
惑星軌道から、秒速12kmで直接大気圏突入をする。  
温度が3000度以上になる。  
そこで、軽量で耐熱効果のあるカプセルを考案した。

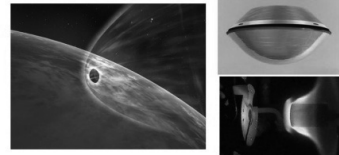


図-15 カプセル

で自分で判断するなり、地球からの指令に従ってジェットを吹く、アクチュエータを動かすというまさしく無人探査ロボットです。

もちろん、地球からのコマンドで支援を行なったのですけれども、小惑星近傍、特に高度400m以下では往復30分かかると地球からの指令では制御できないのです。ですから完全自律に動く部分もあったというのがこのロボット探査機「はやぶさ」でございました。

これがだんだん近づいて大きさが判ってくるころの映像でございます。(図-16)よく皆さんにどの位の人数で開発して運用したのですかと聞かれます。開発した人数はメーカの方或いは大学の研究者含めて大体500人位の方が関わっています。実際の運用は、

運用室も狭かったということもありますし、担当者が来て行なうということで、約30名位がミッション期間中に運用していました。この時、電気推進を使っていませんので、軌道決定をしたり、姿勢を制御したり、サンプルを採ったり、ナビゲーションしたり、或いは科学探査をするチームが集まって30人位。写真の中央に写っているのがプロジェクトマネージャーの川口教授でございまして、ここにいるのが私でございます。ミッション期間中、トラブルがいろいろありまして、ご存知

の方も多いかと思えますけれども、リアクションホイールという姿勢を制御する装置(円盤)がありません。円盤を回すと反対方向に回ります。ですから3軸の姿勢を制御するには、三つのホイールが必要だったのです。ところが三つのうちの一つが8月の初め、それから10月になりまして、もう1台が壊れてしまって、合計2台壊れてしまったのです。実は宇宙研の当時のミッションは、故障モードに対してどういう考え方をしていたかと言いますと、勿論バックアップをたくさん持っていければいいのですけれども重量制限もありまして、一つの機器が壊れてもミッションが失敗にならないように作っています。ですから一個の故障に関しては多少機能が落ちてもミッションは成功するように作っていますが、二個壊れるということは実は想定していません。ですから一個壊れて二個のホイールの時には、搭載ソフトウェアで切り替えて二個で姿勢制御することが出来ました。ところが二つ壊れてしまうと出来ないのです。もう一つのやり方は、二個壊れても最低限の事は出来るようにということで、実は化学エンジンのスタスタを使って、姿勢制御することは出来ますが、実は精度のいい制御は出来ないのです。ですから姿勢制御は出来るが、機能はかなり落ちてしまいます。この時からリアクションホイールは、一個しか使えませんでしたので、ジェットを使って姿勢制御をしました。ジェットを使うということは、燃料を使うわけです。帰りの燃料を気にしながら運用していたのがこの時期です。

「イトカワ」の自転時間は12時間です。動画をお見せしていますが、リアルタイムにやるとほんのちょっとしか皆さんに見せられないので加速しています。これを見た時、ちょっとびっくりしたのは、今まで見た小惑星と全然違うのです。岩肌が見えていて砂が殆んどない、でこぼこしている。何かくびれているように見える非常に変な天体です。もう一つ困ったのは降りる所がない。平らな所がないのです。唯一あるのがこの辺ですが、それでもでこぼこしています。この上の方は平らな所があるのですが、実は

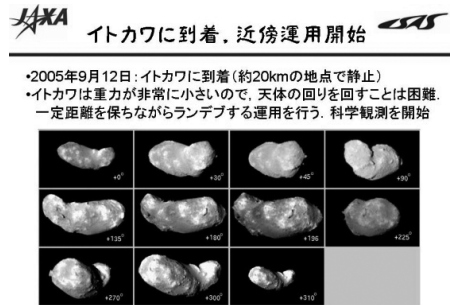


図-16 イトカワへの接近

平らな所が上にあっても降りられないのです。皆さんの方向が太陽，地球の方向で，上から或いは下から接近するというのは実は出来なかったわけです。降りられるのはこういう一部，但し面積は非常に狭い。そういう所に降りなくてはいけないというので，当時観測し終わったらサンプル採取しないで戻ってこようかという意見も出ました。但し，ここまできてサンプル採取しないで帰るのかということで，チャレンジすることに決めたわけです。

それでどんな形に見えますか？ よくラッコに似ていると言われます。(図-17) ピーナッツとかじゃがいもという説もあったのですが，ラッコというのが割と分かり易いということでラッコ説というのがありまして，どうですか，皆さんラッコに見えますでしょうか。見える方ちょっと手を挙げていただいて…，結構いらっしゃいますね。私はじゃがいもかなと思っていたのですが，こうやるとラッコらしいですね。確かにこういうふうに描いて下さった方がいまして，これならラッコかなというふうに思います。皆さん想像豊かなのでこれでも十分認識出来たというので素晴らしいと思います。

科学的に判ったことをちょっと紹介しますと，実は地球上で観測する機会があって打ち上げ直前ですが，地球に接近する時にハワイのすばる望遠鏡で観測すると，いろいろなことが判りました。どういう軌道を通っているか，それで自転周期というのは光の強弱で大体判りました。12時間というのが打ち上げ前に判っていました。設計の段階では判ってないのですが。それから黄道面に対してどういうスピンをしているかが大体判るのです。けっこう凄いなと思ったのですが，形はぼやけていてあのピーナッツ型にはちょっと見えなかったのですが，おおよそ判りました。青い字で書いたのは行ってみないと判らなかつたことです。(図-18)

例えば実際の大きさ。一番長いので535m，一番短い所で200mです。それからスピン軸の角度ですとかそういうことも行ってみないと判らない。それからもう一つ重要だったのが質量。これは重力が判ると体積から質量が判って密度が判るのです。密度が1.9だったというのが非常に新しい発見です。岩石で出来たタイプのS型小惑星というのは，実は密度は今まで判っていたのは2.6位なんです。それよりもはるかに小さい密度ということは大発見だったのです。何かというとこれは中がスカスカ或いは隙間があるような小惑星であるということを証明したわけです。

実は，宇宙が出来た時にビッグバンが起こって，いろいろな塵なり物が集まって出来たという説があって，いろいろな小さい物がくっついたんじゃないかと。いわゆるガレキ寄せ集め説というのがありまして，それはあくまで説だったのですが，「イトカワ」という天体を見たことによって，ガレキ寄せ集め説というのが非常に有効な証拠を得たということで，非常に科学的に価値のある発見をしたという。た



図-17 イトカワ

小惑星「イトカワ」

---

**史上最小の天体は、内部がスカスカ**

軌道要素： 長半径= 1.3238AU 離心率=0.2801 傾斜角=1.6223°  
 近日点=0.953AU 遠日点=1.6947AU (AU=地球-太陽間距離)

サイズ(m)： 主軸 X=535, Y=294, Z=209  
 取り囲む箱のサイズ 550x298x244

自転周期： 12.1324 時間  
 自転軸の向き： 慣性空間 [128.5, -89.66] (黄道面にほぼ垂直)  
 小惑星 [90.53, -66.30] (逆スピン)  
 自転軸のふらつきは測定誤差内

質量： 3.510 x 10<sup>10</sup> ± 0.105 x 10<sup>10</sup> kg  
 密度： 1.90 ± 0.13 g/cm<sup>3</sup> (これまでのS型小惑星は2.6)

(注) 経度は「ラッコ」の頭にある黒いホルダーを起点に取った東経で測定  
 緑色は地上観測によって予めわかっていました

Fujiwara, et al., Science (2006)

図-18 科学観測結果

またまなのですが、たまたま行った天体が思ったより小さかったがために、こういう新しい小惑星を見つけることが出来たというのが、大きな科学的成果です。著名な「サイエンス」という雑誌に特集で論文が掲載されました。

これらの写真は、いろいろな位置から撮った写真で、かなり詳細に撮れています。(図-19, 図-20) 注目するのは所々明るい所があるというのが結構大きい発見でありまして、これが全体を見ても確かに明るい所と暗い所があるのです。何が発見かという、普通天体というのは太陽の放射エネルギーを受けて変形をしていきます。ある波長で見るとだんだん黒ずんで来るのです。ところがこの天体というのは明るい所と暗い所があるということは、中の物質が揺さぶられて外に出て来たのではないかと。これも二つ目の大発見でありまして、隕石等がぶつかって揺さぶられた時に中の物質が出てくるといふような現象がはっきり見えている。この写真を見ても判るとおり、ごつごつした所と比較的なめらかな所があるというのも二分性があるというのもその一つでございまして、こういうふう天体が出来ていく過程で動いていく流れがあるというのがまた非常に大きな発見でございました。科学的発見は他にもあると思うのですが、この二つが大きな大発見でございました。(図-21)

いよいよ着陸をせざるを得なかったというところで、そのために当初予定していたものと若干変更しました。地球から若干コマンド修正を送って、軌道を修正するというのはあらかじめ考えていたのですが、それを頻繁に行ないましょう、接近速度を遅くしましょう、ということになりました。接近速度は3 cm/secです。非常にゆっくり近づく、その間に地球と交信してデータの補正をかけようということを行なって、そのためのリハーサルを3回行いました。そのあと、2005年11月の19・25日に2回タッチダウンを試みたわけです。

「ミネルバ」というロボットは、実はミッション中にやる予定だったのですが、11月12日のちょうど中間のリハーサルの日に落としました。高度50mまで近づくのは危険なので、大体高度100m以下で落とそうという計画でございまして、残念ながら高度30mまで近づけませんので、自律ではなく、地球からのコマンドで降ろそうということを行ないました。

地球から15分前のデータを見ながら15分後を予測して安全な時に落とすことを狙っていたわけです。これは「ミネルバ」というものでございまして、これは日本初の探査ロボットでありまして、且つ世界

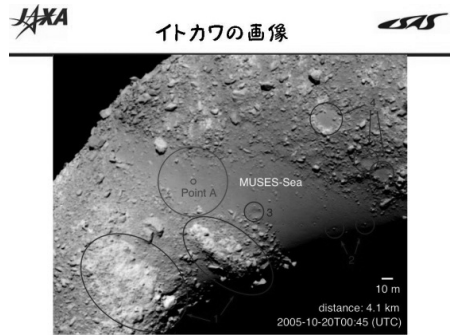


図-19 イトカワの画像1

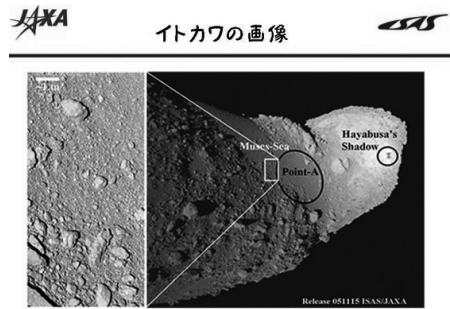


図-20 イトカワの画像2

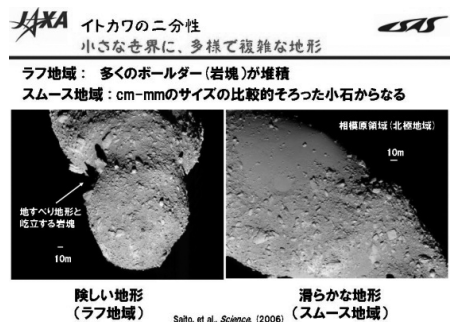


図-21 イトカワの二分性

## “小惑星探査機『はやぶさ』七年間の旅の軌跡”

初の小惑星探査ロボットになるはずだったのですが、ご承知の通り落とすのに失敗しました。(図-22)「ミネルバ」というのは、実は実験的にいろいろな大学の先生と考えながら作ったものでございまして、微小重力の状態では表面を移動するのです。

通常はNASAのロボットみたいに車輪で動くというのを考えるのですが、車輪で動くことは小惑星の表面では難しいのです。皆さんが、例えば自動車を持って行って小惑星の上で動こうとすると、どういう現象が起こるかという、これは

シミュレーションでお見せしたいと思いますが、ちょっとでこぼこがあると力を受けて浮いてしまうのです。車のエンジンをかけてスタートしようと思って、車輪が回った瞬間に力を受けて浮いてしまうわけです。それで浮くと、いくら車輪を回しても前に進まない。ですから小さい天体で動くためには車輪というのは難しいのです。なので、我々はどうせ浮くのだったら、積極的に跳ぼうということでホッピングロボットというロボットを作りました。ちょっと実験の結果をお見せしますが、中にモーターがありまして回すと回転しながらホップする。うまく制御するとフワーッと浮き上がって横に行ける。「イトカワ」ですと大体10m位横に跳べます。それでぴょんぴょん跳びながらいろいろな地形を観測しようということを考えておりました。

コマンドを送って分離をしたのですが、15分後にいだろうと思って送ったのですが、残念ながら予想よりも近くに行くと重力の影響が大きくて近づきすぎたので「はやぶさ」はジェットを吹いてしまったのです。ジェットを吹いた後にコマンドが届いたために、そのジェット分の速度が加わって脱出速度を超える速度で分離してしまいました。予定では5 cm/secで落とす予定が、15~16cm/sec位で落としてしまったために、残念ながら小惑星の脱出速度を超えてしまい、表面に到達できませんでした。分離した時のデータはちゃんととれていて、「ミネルバ」自身は正常に動作をして、分離の直後に「はやぶさ」を撮ろうと思って写真を撮るコマンドも仕込んでおまして、たくさん写真を撮りました。届いた写真はこの1枚なのですが、まあなんとか撮れたかなと。(図-23)

本当は「はやぶさ」全体を撮りたかったのですが、残念ながら回転しながら飛びますので「はやぶさ」の太陽電池の裏側しか撮れなかったのです。実はこのロボットは、たくさん写真を撮っても、意味のある写真しか撮らない、メモリに入れずに送らないということを行いました。宇宙空間を撮って送っても困るのでミネルバ自身で、写っているか写っていないか、あるいはピンボケかどうかというのを判断してデータを送るという自律機能を持っていて、それも確認出来ました。唯一出来なかったのが表面を移動するというのが出来なかったのが残念だったのですが、「ミネルバ」に関してはこうい

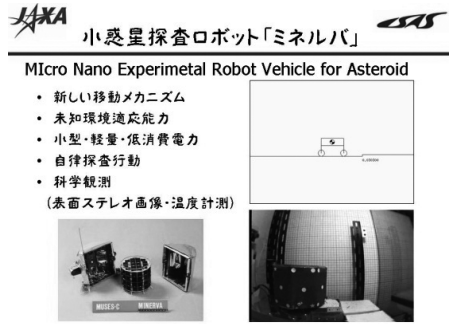


図-22 ミネルバ

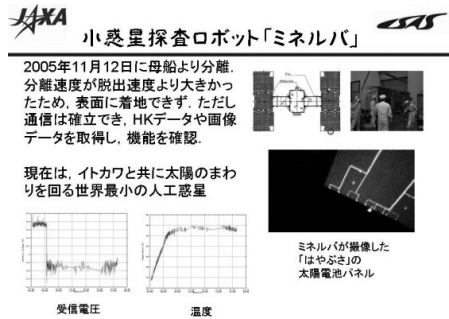


図-23 ミネルバの結果

う結果になってしまった。

それでタッチダウンの場所は、先程言いましたようにMUSES-Seaという海の場所です。(図-24) 実は、ここはこういう凹んだ所にあるので、私としては降りたくなかった場所でございます。というのはこういう凹んだ所に降りると、先程のように重力の影響を受けて引きずられてしまうのです。まっすぐに降りようと思っても右か左に流されてしまう。当時、新聞記者に答えたのは、ジャンボジェット機でグランドキャニオンの底に降りる位に難しいですよとコメントしたのを覚えているのですが、それ位難しいと思っています。

もう一つ「ウーメラ」という地名のついた出っ張った所が安全そうだったので、そこが第二候補になっていました。ここは出っ張った所なので、着陸はし易かったのです。私としてはこちらにしたかったのですが、実はリハーサル最終に写真を撮ったら、この出っ張った所の写真はけっこう岩がごつごつしているんですね。ミュゼスの海というのは海のように比較的平らなところが多いというのが判って、最終的にミュゼスの海に降りるという決断をされたわけです。

着陸のやり方は先程言いましたように、画像を撮って画像の中心に小惑星が来るようにナビゲーションします。あと地上からコマンドを送って、修正を行って近づくということを行っておりますので、それをお見せしたいと思います。

このお見せしている動画は、実はあまり公開されていない動画でございます、だいたい30分から1時間ごとに画像が来まして、こういうふうにゆっくりゆっくり近づいていくわけです。目標とするMUSES-Seaのタッチダウン地点がこの画像の真ん中に来るようにジェットを時々吹いて修正をかけていくわけです。だんだん見えてきたと思いますけれど、これが高度400mで撮った画像です。これ以降は地上からの支援は出来ませんので、ここから鳥の隼のように、10cm/secに加速をして表面に降りてタッチダウンした瞬間に弾丸を打って、サンプルを採って戻ってくるという、そういう自律的なやり方になります。その途中でターゲットマーカを落としてトラッキングをして姿勢を変えながらタッチダウンをするという、そういうシーケンスで進めました。これはターゲットマーカを落とした時の画像で、これが「はやぶさ」の影です。(図-25) これはターゲットマーカでフラッシュをたいた時の画像です。ですからまわりがちょっと明るくなっています。この地点ですが拡大してターゲットマーカがちゃんと分離出来たのを確認出来ています。

最終的にどうなったかと言いますと、実は「はやぶさ」がこう降りて行って、本当はここでタッチダウンする予定だったのですが、この時点、高度10mぐらいで太陽電池の横にあるセンサが何らかの障害物を検出してシーケンスをやめました。そしてジェットを吹いて戻る予定だったのです。ところ

JAXA タッチダウン候補地域 ISAS

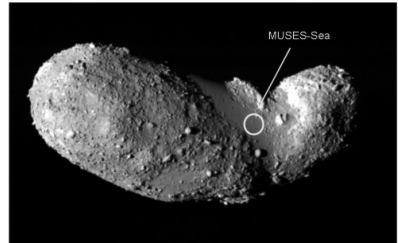


図-24 タッチダウン候補

JAXA ターゲットマーカ落下位置 ISAS

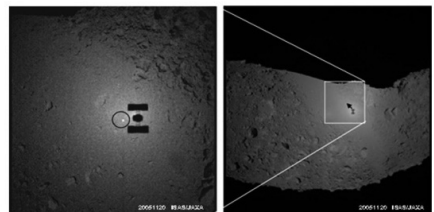


図-25 ターゲットマーカ



がちゅっとスラストのアンバランスがありまして姿勢が乱れました。姿勢が乱れたままジェットを吹きましますと、小惑星にぶつかる可能性がありますから「はやぶさ」自身がやめてしまいました。やめたために若干動いて行って、それであとは重力がなすがままに、ゼロではありませんので、1回目のタッチダウン。この時姿勢制御もされていますから、サンブラホーンがちょうどバネのようにジャンプをしてまた2回目のタッチダウン。そして3回目は静止して横に滞在していました。これは我々当時、地球上の運用室では判りませんでした。何が起こったのか判らなかつた。本来であればジェット吹いて戻ってきて交信を開始するはずだったのですが、そうならなかつた。見ていると、ドップラデータというので見ていると、どんどんどん小惑星の中に入っているように見えるんです。もしかしたら小惑星はスカスカのものでどんどん地中に潜っているのではないかと思った位、そういうデータを示しておりまして、ここでじっと我慢して待っていたのですが、これ以上我慢すると地球に対して或いは太陽に対して裏側に行ってしまうとミッション失敗になるというのを心配して、判断しました。そこでコマンド送って届いた15分後にジェットを吹いて戻ってきたというのが1回目のタッチダウンの結末です。

1回目は弾丸を撃ち込んでいませんので、2回目のチャレンジをしようということで2回目のチャレンジを行ないました。ジェットを吹いて遠くに離れたところから、タッチダウン軌道に戻してタッチダウンをさせたわけです。1回目に落としたターゲットマークがちゃんと残っていたという証拠の写真も撮りまして、タッチダウンをしてシーケンス通り戻ってきたわけです。ところが戻ってきたところで穴が開いて燃料漏れを起こしました。燃料漏れが起こると何か外に出ていくわけですから、姿勢が乱れてきます。これで電波は来ているのですが、テレメという状態が判らなくなりました。キセノンガスを使って姿勢制御の立て直しを行なったのですが次の週、12月8日に大きな燃料漏れがありまして、姿勢が大きく乱れて太陽電池に太陽が当たらなくなって電源がオフになり、以降、音信不通になりました。要するに電波も受信出来なくなつた。見失つたというのが12月に起こつたことです。

どうなっている状態かといいますとタンブリングです。めちゃくちゃな回転をして、ぐるぐる回っているだろうというのを想像しました。いろいろ策を講じたのですが、音信不通になっていました。いろんな計算をするとこの探査機というのは、サンブラホーンの軸周りに、最終的には落ち着くようになっています。これは慣性主軸というのですが、物体がぐるぐる回っていても最終的に時間が経つとある安定したところで回るので、ですから慣性主軸周りに回るといふことは、太陽電池がぐるぐる回るようなものになりまして、それがうまくすると太陽の方向を向く確率というのがございまして、だいたい60%の確率で太陽を向くであろう。ですからその時は電源が自動的にオンになります。ただしコンピュータは立ち上がらないのです。電源は入るがコンピュータは立ち上がらない。立ち上がるためにはコマンドを受けないといけないのです。問題は水晶を使っていますので、温度が変わると通信周波数が変わるといふのが大きなネックでした。送信周波数も受信周波数も変わってしまうわけです。その周波数が判らない限り通信ができません。温度が判らないわけですから出来ないのですが、考えられる温度範囲で考えてみると周波数ってかなり広いのですが、限られます。ですから我々が考えたことは、送信周波数をいろいろに振って、且つ受信周波数もいろいろに振って探査機にコマンドを送り続けるレスキューオペレーションというのを開始しました。一通りの周波数をスイープするのにだいたい3か月かかります。

1年間で60%で太陽電池に当たる。たまたまその当たった時期にどんぴしゃりとその周波数が行けば通信出来るはずだということで、微かな望みにかけてコマンドを送り続けたわけです。幸いにも1か月半位、翌月1月の20何日かだったかと思いますけど、そこで電波らしきものを受信したのです。これを見つけた人は凄いなと思いますが、埋もれている信号からこれが「はやぶさ」の信号だっていうのを感じてそちらの方向に微調整をしたら確かにデータであったということで、やっと見失ってから1か月ちょっとで見つかりました。これが「はやぶさ」が見つかったもので、ただし見つかった時に電波の強弱から非常に速く回転しているというのが判りました。まずスピンを止めないと通信が出来ないので、スピンを止める作業を行なったのですが、実はジェットは燃料漏れを起こしているので使えないと判りましたから奥の手を使ったわけです。

一つのやり方は、お聞きかもしれませんが、イオンエンジンに使っていた中和器のガスです。このガスはコールドガスと呼ばれていて、燃料で燃やしているわけではないので力はないのですが、実は横方向に斜めに出している分、重心に対してオフセットになっています。そうすると推力の方向と重心が一致していませんから、探査機に対して力が出せる。力が出せるということはスピンを止められるのです。それでこのコールドガスを使ってスピンを止めるということを行ないました。その結果、スピンレートが落ちて「はやぶさ」と通信が出来た状態です。要するに目を開いている状態ということで、このような状態になったわけです。

もう一つ大きなトラブルがありました。去年の11月ですが、イオンエンジンを一番最初に紹介しましたが、どうしても寿命があるのですという話をしました。我々スタッフは、いつイオンエンジンが止まるかびくびくものでした。翌日運用に行くとイオンエンジン止まってないかなと、まず最初に確認をしました。それで状況がどうだったかといいますと、4つエンジンがありまして、A・B・C・Dあります。Aのエンジンは打ち上げ当初からちょっと調子が悪くて推力が弱かったので殆んど使っていないのです。それからBのエンジン、Cのエンジン、Dのエンジンは元気でしたので、これを使って「イトカワ」に行って帰ってくる予定でしたが、Bのエンジンの中和機だったと思いますけれど、調子が悪くなってあまり使えなくなった時期があり、Cのエンジンも中和機がちょっとへたってきて電圧が高くなって推力が実は半分しか出せないようになっていました。要するに中和が完全にかかないので、推力が半分になってしまったのです。Dのエンジンが元気だったので、これで地球に戻る予定でいたのですが、確かにちょっと電圧が高くなる傾向があって、壊れる可能性があるなというふうにびくびく去年の夏見たわけです。ところが11月になった途端にこのDのエンジンが残念ながらストップしてしまいました。ですから、あとCのエンジンしか残ってないのです。ただし推力が半分である。推力が半分であると残念ながら地球に戻って来れないということが判っていました。それでももうお手上げ状態。スタッフ一同いろいろ考えてこれは困ったという時期がありました。

それで奥の手が実はありました。この状態でも地球に戻ってくる解があったのです。どういう解かと言いますと、半分の推力でも例えば地球のスイングバイをしてもう一度太陽の周りを回って地球に戻ってくるとこの半分の推力でも地球に戻る軌道がある。ただしあと2年かかる。あと2年の間にこのCが壊れる確率は更に高いのですがゼロではないと。ですからこのままの状態ではだめで、もう1回太陽

の周りを回って地球に再チャレンジする。要するに2年後に戻ってくるっていうのも可能性はゼロではないけれどあるというのが判りました。ただしそれはかなり絶望的な解だったのです。更に2年間このCがもつという保証は殆んどないわけですから、限りなくゼロに近くて、みんなお手上げ状態だったわけです。

ある時にこのイオンエンジンの担当者が、AとB、或いはAとC、AとD或いはBとDとか二つのエンジンを組み合わせたらどうかという提案をしてくれました。要するに一番最初に紹介しましたが、イオンエンジンというのはイオンを作る、プラズマ状態を作るエンジン部分と中和器で構成されている。その二つを別々の、たぶん両方壊れているということではなくて、片方が壊れたのだから、AとAの一部は壊れてないはず、殆んど使っていないわけですから、その部分とほかの機能を組み合わせるとうまくいくのではないかというふうに提案がありました。

提案はいいのですが、勿論、制御則なりソフトウェアの書き換えは可能なのですが、ハードウェアは変えられないわけです。ですからそんな無理だよって話をしたら、実はこのAとB、他の機器と回路を繋げてあるダイオードを入れてあるという話が突然出て我々びっくりしました。そんな話聞いていなかったのです。担当者は四つのエンジンがどれもダメになったらお手上げか、それは嫌だなということで出来ることをやろうということで簡単な修正で四つだめになっても何とかできるクロス運転というのを実は考えていたそうです。勿論イオンエンジンを作る側ですから、不具合があってはいけないわけで、そんなの使うとは思っていなかったそうですが、幸いにもそういうダイオードを入れてあったということで生き延びました。

ここに書いてありますけれど、これはAのスラスタでイオンを作る所はちょっと調子悪かったのですが、中和器は殆んど使っていなかったのです。こちらBなのですが、Bのエンジンはイオンを作る所はいいのですが中和器がもうダメだった。ですからそれぞれダメな所を取り除いてこの内側のループでAとBをクロス運転することで対応しました。実はAとBとかAとCとかAとDいろいろ試したのですけれど、うまくいったのはAとBだけでした。本当に我々スタッフは、これは今度こそダメかと思ったのですが、このダイオードが一つ入れてあったために生き延びたということでそのスタッフの名前をとって「クニナカマジック」というふうに我々仲間では呼んでおります。(図-26)

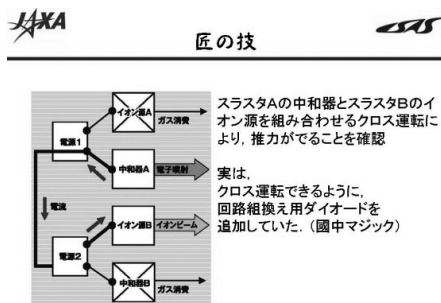


図-26 匠の技

地球に戻ってくるところは、皆さんご存知かもしれませんが、こういう軌道でありまして、打ち上げの時からもうオーストラリアに落とすというのは決まっています。打ち上げ時期に戻ってくる時期が判るとそれは自動的に決まって来るわけです。ただしシューメラというのは、この南オーストラリアにあるのですけれど、近くにシドニーとか大都市があるわけですね。(図-27) そういう所にカプセルを落とすわけにいけないので、慎重にイオンエンジンを使って地球すれすれになるまでをまずコマンドを送って軌道修正を行いません。その間にトラブルがあったら諦める予定でしたけれど、順調にいきましたの

で、徐々に修正してオーストラリアの南に落とすということを行なったわけです。

カプセルの回収の方法をこれからちょっとお話しますが、カプセルは3時間位前、大気圏突入前にカプセル分離します。(図-28)分離すると大気圏突入で燃えます。燃え尽きるのは外側のシールド部分だけで中のカプセルは燃えないように守られています。大気圏突入が終わったら、外側のシールドを二つとも分離して中からパラシュートが出てきます。秒速何キロで突っ込んでいきますから、地面に落ちると壊れてしまいますので、パラシュートを開いて減速をしていく。それで着地点を見つけるために電波を出します。電波をトラッキングして見つける予定でした。電波が出る装置というのは、打ち上げ前に作って宇宙空間を飛んでいる間は電波を出せませんでした。中に搭載の電池があるのですが、これがちゃんと7年後に、実は4年後に戻ってくるはずだったのですが、まさか7年後になるとは思っていないから、寿命ぎりぎりだったわけです。もしかしたら電波が出ない可能性がある。そのために地上からカメラでこの発光しているときの観測をします。カプセルの軌道がわかれば大体、勿論誤差は大きいですが着地点を推測出来るので、光学カメラ班というのを配置しました。更に当日曇りだと見れないので、航空機で雲の上から観測するという、もう何重にも手段を抗して回収に臨んだわけです。3日位前は曇りの予想だったのですが、当日幸いにも晴れまして、パラシュートも予定通り開いて、電波も出たので無事回収が出来たというしいです。電波方探班というのがいまして、4か所で電波を受信します。電波を受信した方向を探っていく交点が、カプセルが飛んでいる所になるわけです。

それから分離直後はいろいろなことをやってもいいよと言われました。弾丸を打ってみるとかレーザーで距離を計ろうとかターゲットマーカを落とそうとかいろいろなアイデアが出たのですが、スタッフ一同で一つ皆が同意してくれたのは、カメラをオンにして地球を撮ろう。ちょっと感情移入になってしまうのですが、「はやぶさ」に故郷の地球を見せたかった。「はやぶさ」に写真を撮って地球を見せたかったというのは皆さんスタッフが思ったことです。カプセルを分離すると、物を外に出すと動くわけですから、姿勢が乱れるのですが、姿勢制御の方をなんとか行なって、地球の方にカメラが向くようにして写真をとりました。実はですね7~8枚の写真を撮りましたが、なかなかうまく地球に向けられませんでした。それで最後に撮った画像がこれです。(図-29)これが地平

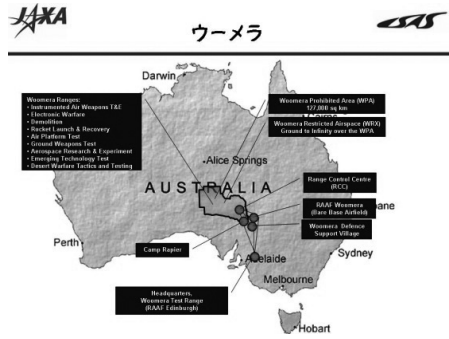


図-27 ウーメラ

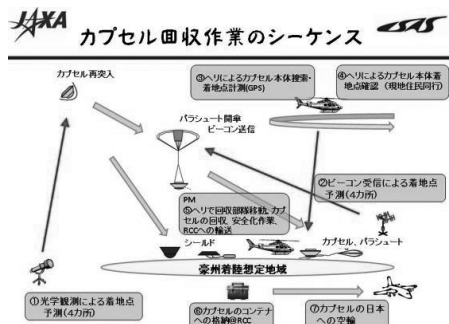


図-28 回収シーケンス

それから分離直後はいろいろなことをやってもいいよと言われました。弾丸を打ってみるとかレーザーで距離を計ろうとかターゲットマーカを落とそうとかいろいろなアイデアが出たのですが、スタッフ一同で一つ皆が同意してくれたのは、カメラをオンにして地球を撮ろう。ちょっと感情移入になってしまうのですが、「はやぶさ」に故郷の地球を見せたかった。「はやぶさ」に写真を撮って地球を見せたかったというのは皆さんスタッフが思ったことです。カプセルを分離すると、物を外に出すと動くわけですから、姿勢が乱れるのですが、姿勢制御の方をなんとか行なって、地球の方にカメラが向くようにして写真をとりました。実はですね7~8枚の写真を撮りましたが、なかなかうまく地球に向けられませんでした。それで最後に撮った画像がこれです。(図-29)これが地平

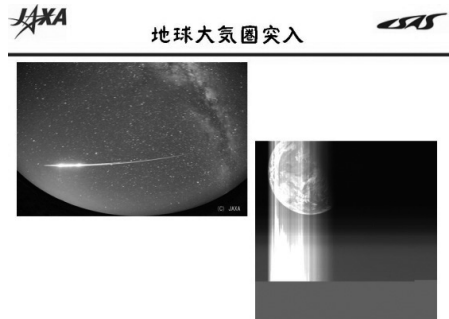


図-29 地球の写真

線すれすれになった時に送ってきてくれた画像で、このグレーの部分は実はもう地平線すれすれなので電波が来なかった部分です。幸いにも地球は上側に写ってしまってこの写真が撮れて「はやぶさ」に地球を見せることが出来たということは皆さんもご承知の通りです。

もう一つ、この線は何かということ、宇宙に持っていけるカメラというのは実はシャッターがついていないことが多いです。シャッターというのは、今は電子シャッターも最近ありますが、メカニカルで動かすシャッターというのが多く使われていたのですが、動く部分というのは宇宙では極力避けたいのです。動かなくなったら終わってしまうわけです。シャッター閉じたままで動かないと写真がもう撮れなくなるわけですから、通常カメラにはシャッターを付けません。シャッタースピードというのは露光時間で調整するのですが、こういう写真を撮るとこのライン上のデータをどんどんCCD素子で写ったデータをどんどんメモリに送っていくのですが、どうしても上の方にある画像データというのはメモリに送るのに若干時間がかかります。ほんの何mmsecという時間なのですが、その間にシャッターがありませんので光が入ってしまうのです。そのためにこういうふうに見え、スミアというのですけれど、そういうふうな画像です。実は、こういう現象は既に判っていますから、露光時間に依りて補正する機能が搭載コンピュータにあったのですが、残念ながらトラブルがあった時にこの搭載コンピュータがちょっと調子が悪くなって、実際に降ろしたのがこの生画像です。処理は判っていましたから、地上でスミアを補正したのがこの画像で、この2枚の画像はホームページにアップしました。皆さんどういふわけかこちらの画像ばかりダウンロードしているという結果が見られまして、95%位の人は殆んどこちらをダウンロードしていたというのがあとで判ってちょっとびっくりしたしだいです。

最終的な運用では、大体やはり20~30人のスタッフで運用をしておりました。私はカメラの担当でもあったので、この写真を撮る準備をしていたのですが、もう一人担当者がおりまして、まあ一人いれば十分できますので、私はオーストラリアに向かったわけです。但し、私のコンピュータで画像処理をしていたので、そのセットアップをしなくてはいけなかったのですが、5年前に使ったコンピュータなので立ち上がるかどうか心配だったのと、もう一つはパスワードを忘れていてオーストラリアに行く直前に立ち上げてチェックした時になかなかパスワードを思い出せなくて、ソフトウェアをもう一回作るのに日位かかるのでオーストラリアに行けないかなと思ったのですが、幸いにもパスワードが有効になりまして立ち上げてオーストラリアに向かったしだいです。

これがオーストラリアで撮った写真ですが、これは火球と  
AXA  
言って、大気圏に突入した時の「はやぶさ」が燃えている様子です。(図-30) 私はオーストラリアの運用室で電波を受信して位置を決めていました。四か所でデータを取ってその交点が「はやぶさ」のカプセルが飛んでいる位置です。見ていると徐々に近づく、ここから電波を受信出来てこう動いていたのですが、ある時から逆にカプセルが動き出したんですね。これは何が判ったかということ、あっ、パラシュートが開いて風で戻ったのだなというのがはっきり判った瞬間でした。

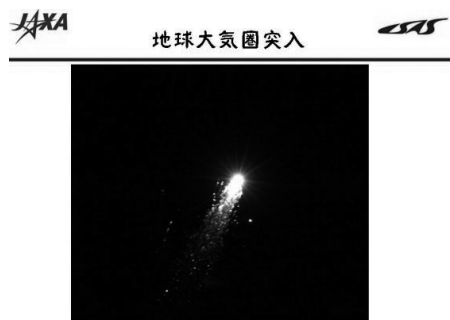


図-30 大気圏突入

ですから皆で喜んだ写真がありますけど、私はちょっと暗くて見えないかもしれませんが、ここにいるのが私でございます。電波は受信出来ましたから、許可が出てからヘリコプターでその電波の所を追っかけて行って、夜だったのですがライトでカプセルを確認して、ヘリコプターはその日は戻ってきました。それで皆でヘリコプターを迎えた写真がこの写真です。

JAXA

カプセル発見

JAXA

翌日朝になってからカプセル回収に行ったんです。ところがこの場所というのは聖地でありまして、原住民の許可がないと入れないのです。ですから原住民の方にまずヘリコプターに乗っていただいて現地を確認して、我々スタッフが入ってもいいかと確認をとってから入りました。これが入った写真です。これがカプセルが落ちた地点。それで火薬、火工品がありましたので、こういうプロテクターをして安全を確認して安全装置が確認出来てから回収に行ったというんです。(図-31)



図-31 カプセル発見

ここでちょっと戻ってきた様子をビデオでお見せしたいと思います。これは五島光学のイイヤマさんという方が撮影したのですが、地上から観測したものです。星がいくつも見えます。大体「はやぶさ」が向かっている方向だろうというのを見てまして、動いてくるものが「はやぶさ」です。ちょうど大気圏突入したところございまして、青く光っているのは、キセノンガスが燃えているところです。こういう形でいろんな場所で、当日は晴れましたのでよく撮影できました。ほかのものは燃えてしまうのですが、カプセルはシールドされているので守られているという、こういう流星の形をして大気圏に突入しました。突入が終わるとシールドを切り離してパラシュートが出てくるということです。こういう状況で地上の人は確認出来たのですが、私は残念ながらオペレーション室の中にいたので、肉眼ではちょっと見れなかったのです。

もう一つ続いてちょっと別の場所から撮った映像をお見せしますが、実は阿部新助さんという「はやぶさ」のサイエンティストのチームの一人で、感極まってちょっと大声出しますが、お許しいただければと思います。(映像・はやぶさが落ちてくるころ)

ちょっと感極まって叫んでいるのですが、こういう状態で地上では観測できたそうです。

カプセルを回収し、更に翌日、ヒートシールドというものを回収しました。これは回収に行ったヘリの陰で私もこのヘリコプターに乗っていたのですが、こういう状態で表側と裏側とといいますか、ヒートシールドが予測地点にちょうどこういう形で見つかりました。これ何かって聞かれるのですが、着地した時に回収しようと思っていて目印のために判りやすくするためにつけた旗だそうです。こちら側は大気圏突入の表側で表面がやはりまる焦げになっていたのを確認しております。それでせっかくですので最新のビデオを持ってきましたのでビデオを見て頂ければと思います。以上のあらましの15分ほどのビデオにまとめていますので、これはJAXAで作った最新のビデオになります。

(ビデオ上映) 音声の特に入っていませんのでちょっと解説をしますと、先程言ったいろいろな機器がついているものでこれはイオンエンジン4基です。スラスタが12基ついています。「ミネルバ」はこ

こについてまして、レーザ距離計とかカメラがこについています。これは鹿児島県内之浦で打ち上げた時の様子です。M-Vロケットという固体燃料で飛ぶロケット。これは回収カプセルの最終組み付けの時です。この黄色の幕が断熱材ML I というものです。…これは鹿児島県の内之浦で最終組み付けをしておりましてこれが完成状態です。もちろんここで最終的なファンクションチェックを行なってからロケットに搭載をします。これはM-Vロケットの上段です。ここにロケットと探査機を組み付けてノーズフェアリングで蓋をします。蓋をした後にも更にもう一回チェックをします。ここで何か問題があるともう一回ノーズフェアリングを開けたりして非常に大変な作業になってしまう。ロケットは3段式ですので、1段、2段、3段と繋げて打ち上げの日を迎えた所です。…宇宙空間に出ますとノーズフェアリングを開いて、結構いろんなものが飛び出ているのがよく判りますね。…これで3段目に点火して軌道に乗せるってことを行ないます。…3段以外にキックモーターというのをもう一つ付けて加速して分離しています。分離が終わったら太陽電池を開くという作業をしています。これは先ほどお見せしたのと同じですがちょっと面白い開き方をします。小さくたたんで広げるということでちょっと面白い折り方をして広げていくわけです。これは太陽電池で、1AUで2.6kW発電します。これはサンブラホーンで大体1mの長さです。これはイオンエンジンです。大体打ち上げから1週間後にまずチェックでイオンエンジンを点火しました。基本的には往きは3個使って、電力が少ない時には低消費電力モードということで2個のイオンエンジンを使ったりしました。

…2年後に「イトカワ」に到着したところですが。こんな形でピーナッツぽかったのですけれど、見る場面によって全然顔が違ったのです。異常にごつごつした天体というのは、これは今まで見たことがない天体です。いくつか地名を使わせて頂いて名前をつけています。ここが着陸地点に選ばれたところです。

…太陽を背にして近づいて行ったのです。これはターゲットマーカ。たぶんこの位、弾んだのだらうと思っています。こういうふうサンプルを採る予定でしたが1回目は途中でやめてしまったので弾丸を撃ち込んでいません。弾丸を撃ち込むとこういうふう硬い岩石でも飛び散るので、非常に高速に採れます。地上実験で行なった感じではまあ最低でも数gは採れるような実験データが得られていたのですが。2回目の時はタッチして戻って来たのですけれど残念ながら弾丸は打ち込んでなかったような形跡がみられています。

ここは相模原にあります運用室の廊下です。いろいろな方からメッセージを頂いていて、これが実際の管制室です。ここでコマンドを送ったりしました。

…1回目の様子は、近づいて行ったのだけれど戻って、小惑星表面にこんな状態に30分いたのんだらうというのがデータから判ったことです。運用室は何が起こったか全然判らなかったのですけれど、コマンド送って、ここは決断したところです。面白いのですが、緊急コマンドというのを用意してまして、その番号が119なのです。再チャレンジしようということで一週間後にチャレンジを出しました。…すべてシーケンス通りいって、やったという形でほっとした束の間トラブルが起きた。…来るデータは15分前のデータなのですが、それを予測していました。これちょっと有名になったのですけれど、カメラモードがシーケンスが終わるとこういうモードに切り替わるんです。それでシーケンスが全部進

んだというのを確認して、この方、的川先生というのですけれど、思わずVサインを送ったというので非常に有名になっています。

…弾丸を打っていない可能性が高い、それからもう一つはですね、たぶんタッチダウンした影響で壊れたのだと思いますけど、穴の開いた位置っていうのは探査機の上側なのですね。それがちょっと判らなくて全部のスラストのパイプの所を全部締めまして、もう使えない状態になりました。それでこの中和器のガスを使って姿勢を立て直したのです。それで1月に見つかってスピンを落として通信が出来るようになった。そしてお話ししましたように2009年11月にイオンエンジンの故障ですね。

…今年の3月、4月にかけて微調整を行ないながら地球に、ここはちょうど微調整が終わったところです。それで6月13日にカプセルを分離しました。…ここで相模原の役目はすべて終わったところです。先ほどお見せしたように地球の画像です。ちょっと上の方は切れてしまったのですが、なんとか「はやぶさ」に見せられた。…非常に高速に、スペースシャトルは速い速度で大気圏に突入しまして、これは、NASAが撮ったのですけど、NASAもこういうデータが欲しかったのですね。ですから航空機をチャーターして彼らはデータを取っています。(はやぶさがかえって来たところの映像の音声)

…これはオーストラリアの管制室です。…これは位置を検出している所、これはヘリコプターで回収に行く時に写真を撮ったものです。これがこの状態で見つかりました。それで翌日ヘリコプターで実際に降りて回収するところです。実はこれ、砂漠といってもこの年、雨が多くて水たまりも結構あって、池に落ちたらどうしようかとみんなで祈っていた時期があって、落ちないようにと祈っていました。これが安全装置。火工品の所を安全にして、それから回収したところです。一応密閉した袋に入れて。それからこれはその更に翌日に回収したアブレターというのですけど、ヒートシールドの表側、それで羽田にカプセルとヒートシールドを持ち帰って相模原に到着した状況です。…これは「はやぶさ」のカプセルが入っているボックスですね。キューレーションセンターという防塵というか無埃のところに入れて分析をしました。…これはサンプルを下から見たところです。(図-32) キューレーション設備で人間は入らずに手だけがに入って細かい作業をする。残念ながらたくさん入っていないくて小さい粒子がいくつか見つかりまして、その分析が思ったより小さかったので、1mg位かなと思ったらもっと小さくて分析に非常に時間がかかっていると聞いています。結果が出るのが今年の12月位に結果報告があると聞いているところです。



図-32 サンプル分析

ビデオはこの位にして、最後にまとめたいと思いますが、これが最後に回収したカプセルで、このカプセルの中にサンプラーのコンテナが入っています。この時私はオーストラリアに行っていて、この方にちょっと振ってみてといったのです。石が入っていると音がするだろうと単純に聞いたのですが、実は、この重さが6kgもあって結構振るの大変だったみたいで振ってくれませんでした。

最後にまとめたいと思いますが、一つ。世界初をやったのですが、近頃最近、世界一になるのに何の意味があるのかというような話題がちらちらとありまして、私なりに考えをちょっとお話ししたいと思



います。実はアメリカのNASAは自分の国は何でもNo.1、特に宇宙ではNo.1であるということをおもろいことはいくつかありました。ひとつは「はやぶさ」は世界で2番目の惑星から帰還した探査機であって、1番は「スターダスト」である。「スターダスト」というのは彗星に行ってサンプルを採ってきたミッションなのですが、惑星から戻って来たのは「スターダスト」が一番で世界で2番目なのが「はやぶさ」であると言っている。もう一つ、「はやぶさ」のカプセルは世界で2番目に速い速度で再突入した、1番は「スターダスト」である。「スターダスト」がまあサンプルリターンで戻って来たわけで、2番目に速い速度で再突入したと言っているのですね。アメリカは今、火星サンプルリターンというのを考えていてスペースシャトルでは遅いのもっと早い速度で突入した時のデータが欲しいのです。ですからNASAは単独で飛行機をチャーターしてデータをとっている割には「はやぶさ」は2番目であるというふうな言い方をしているのです。何が正しいかという、一つは「はやぶさ」は地球圏外、月よりも遠い所の天体に軟着陸して、軟着陸をしたのはNEARもそうなのですが、帰還した世界初の探査機であるということは確かです。ですから世界で一番であるということなのですが、彼らはそういう報道は一切しないです。アメリカって国は面白いのですが、国民に対して自分の国はNo.1であるという自信と誇りを持たせるように徹底しているわけです。日本はどうなんでしょうねというのを一つ言いたいのと、もう一つは、こういう世界最高の技術、今までやったことのない技術を駆使して遂行することによってまた次が見えて来るかなというふうに私自身は思っている所で、やはり世界一というのはいろいろな分野でもそうだと思いますが、重要なのだろうというふうに思っているだけです。

最後に私なりに「はやぶさ」がもたらしたものはなんであるかということをお話して終わりたいと思います。これはプロジェクトで割と言っている事なのですが、ちょっと堅苦しいのですが、「はやぶさ」は地球圏外の天体に着陸し帰還した史上初の宇宙機で独創的なアイデアと新技術を駆使して成し遂げたものなのですが、日本の宇宙技術を世界にアピールしたとともに新たな宇宙探査の展開に資する礎を築いたというのはその通りなのですが、もうちょっと平たく言うと、惑星表面の着陸、往復の航海、帰還、回収を実証出来て太陽系探査に大きな一歩を踏み出せたかなと私自身思っていますし、小天体のその場観測の結果から新しい知見が得られた。いわゆる、がれき寄せ集め説や、中の物質が移動するって新しい知見が得られました。サンプルがどうかは12月にならないと判らないのですが、そういうサンプルを採ってきた可能性もあります。もう一つは、オーストラリアから帰ってきてちょっとびっくりしたのですが、国民に感動と共感、そして宇宙への関心です。皆さんお話しした時、「はやぶさ」って皆さん知らなかったと思うのですが、最近皆さんよく知っている。そういう勇気を与えたのではないかなと私自身思っておりまして、これが「はやぶさ」のもたらしたものかなと思っています。もう一つ最後にお話すると、こういったことの成功というのは実は、勿論技術もあったのですが、技術よりもやっぱり根性だったかなという気がします。何度も諦めかけましたが、やはり諦めずにミッションを遂行したというのが一番大きくて、その原動力というのは、実は「はやぶさ」の応援というのをたくさん皆さんからいただきましたし、チームワークというのは非常に良かったと思っています。

メーカーの方も大学の研究者もJAXAのスタッフも一丸となって同じチームとしてアイデアを出し、汗を流したという点で「はやぶさ」が成功したのかなど。かれこれ20年近くやってきたことで、ミッション期間が7年というのは確かに長いのですが、その前の段階の準備というのも非常にありました。そういうチームワークがよかったお陰で「はやぶさ」の成功に導いたのかなというふうに個人的な感想を述べさせていただいて、まず講演を終わりたいと思います。皆さんに残り時間質問を受けたいと思いますのでよろしく願いいたします。どうもありがとうございました。

### 《司会》

長時間にわたりありがとうございました。それではせっかくの機会でございますので、どなたがご質問なさりたい方はいらっしゃらないでしょうか。はい、お願いいたします。

### 《質問者》

面白いお話ありがとうございました。「はやぶさ2」についてお伺いしたいと思います。川口先生や吉川先生のお話から、サンプルリターンをしてカプセルを地球にリリースした後に、エルテンで経由して未来の人類が本体の回収をするなどというような夢のあるミッションを検討されているとの話もお伺いしているのですが、その「はやぶさ」は今回燃え尽きましたけれども、「はやぶさ2」がもし順調に進むようでありましたら、そういった場面が出てきて、私たちは多分その時に新たな感動を得ることになると思うのですが、そういったカプセル、今回なかったカプセルを放出した後、私たちは未来に向けて何か夢を持てるような、どういったミッションをお考えなのか、もし今お話しいただけるようなことがあればお願いしたい。

### 《久保田講師》

はい、「はやぶさ」の次のミッションはどうでしょうかというまず質問だと思うのですが、この「はやぶさ」ミッションは、一番最初にお話ししましたように工学実験ミッションなのです。工学技術を確立しようというミッションです。それはどういうことかという、その次に科学ミッション、本格的な科学ミッションをするための第一段階という位置づけで提案してきたわけで、当然「はやぶさ2・3・4」というのがあるわけです。小惑星って実はいろんなタイプがありまして、いろいろなところに行ってみないといけないというのが科学者が言っている事なのですが、「はやぶさ」で終わるということはそれはありえなくて、単に技術を確立しただけではなくて、それを生かすということをしなくてはならないので「はやぶさ2・3」というのは打ち上げ前というか、打ち上げた後も前もそういうのを検討してきています。

さてご質問の「はやぶさ2」というのは、「はやぶさ」が戻ってくる前からすでに提案しています。というのは戻ってきてからやるのでは時間がかかるわけですね。戻っている最中にでも「はやぶさ2」でどういうことをしたらいいだろうかと議論はしていました。そういう提案をしてきたわけです。こういうご時世になったということと惑星探査って小惑星だけではなくて月も火星も金星も水星もあるわけで、それをどういうふうな戦略でやるかというのは限られた予算、時間、人員の中でやっていかなくて

はいけなくてそういう議論も勿論あるのですが、「はやぶさ」が皆さんの支持を受けたお陰で「はやぶさ2」ということが国民からも支持されて、宇宙開発委員会では意義があるということで「はやぶさ2」の意義が十分認められています。あとは国として予算をつけていただいてスタートするというのが、たぶん、今はまだ完全に認められていませんけど意義は十分認められていて、あとは国の戦略として「はやぶさ2」をどうするかというのが年内なのか年度内なのか判りませんが近々決まるといふふうに聞いています。狙うとすると2014年打ち上げなのです。あまり時間がありません。狙う天体は、今度は違うタイプを考えています。「はやぶさ」が行ったのはSタイプという天体、Sというのはストーンという意味なのです。岩石で出来た天体。今度狙う天体はC型です。Cというのはカーボン、炭素で出来ているのですね、ちょっと違う物質で出来ている。ですから、今まで見たことがない天体にたぶん行くのだらうというふうに思っていて、そこから得られる科学的或いは技術的或いは新しい知見というのはまた違うものだらうと思っています。単純に言うとCで出来たものっていうと、単純に浮かぶものはダイヤモンドですよ。新しい物質があるかもしれないし、新しい手掛かりが得られるかもしれない、そういう天体を「はやぶさ2」では今検討して狙っています。ミッションになるかどうか最終的には判りませんが、皆さんの支持をうけていい風向きで行っているのではないかなと私自身は思っています。それからミネルバは残念ながら落とし損ねましたので、リベンジをはかりたいというふうに思って搭載する予定で今検討している状況で、勿論今年の12月に金星探査機「あかつき」が軌道に乗ったり、水星、マーキュリーに打ち上げたりと色々なこと行なっていくしますので、色々な意味で惑星探査ときどきわくわくすることが皆さんにお見せできるんじゃないかと思っています。ちょっと回答になっていない部分あるかもしれませんがよろしいでしょうか。

### 《質問者》

まず私の感想としては、誰が言ったか最近のスポーツ選手だと思いますけど、努力したものにだけ幸運がもたらされるといったような意味の言葉を聞いたような気がするのですが、その言葉を思い浮かべておりました。大変なご努力があったものとお察しします。最後にチームワークという言葉が出てきたのに思いを深くしたのですが、これだけたくさん新しい技術を組み合わせて一つのミッションに向かっていくということになると、当然、各分担当したチームの進行速度に差が出るというようなことがあったんじゃないかなと思うのですが、それを一つの目標にまとめていくときのご努力或いはポイントというのはどんなものがあったのかなとよろしければ教えていただきたいのですが。

### 《久保田講師》

はい、おっしゃる通り、各機器、各サブシステムに別れてやっていくわけですが、例えば開発の段階でトラブルというものはつきもので、みんなが集まる噛み合わせという全機器集まって組み立てる時期があるのですが、やはり遅れたりすることがありました。そういう時にはやはりプロジェクトの進行上遅れると乗らなくなってしまうのです。ところが肝心の機器、バス機器と言うのですが、電源であったり通信であったりコンピュータなどは絶対持っていかななくてはいけないものは、遅れたらまずいわけです。そういう時には遅れたってことが分かった途端に、遅れる可能性があるということから専門家なり

いろんな人を巻き込んで、とにかく集中的に解決するという方策をとっています。もう一つはお互いの情報のやりとりというのを非常にスムーズにいくようなやり方をしました。それはよくやっていることですが打合せを頻繁に行なうのですが、ある程度の規模以上になるとそれがなかなか出来ないのですが、スタッフ大体運用では30~40人、開発の時だと100~200人なのですが、それ位の人数は割とまとめやすかったかなと思っています。もう一つは、目標がはっきりしていて且つ高いのです。そういう場合には全部正直に言わなくては大変なことになりますし、意思疎通というのは非常に重要で、こういうプロジェクトをやる時には、いろいろな開発メーカーの方にご協力いただくのですけれど、やはり各企業の企業秘密なりノウハウというのがありますから、なかなか言えないこともあるのですが、今回のプロジェクトに関して言うと、やはり他のシステムにも口を出しながら、お互い同じチームとして、所属うんぬなしに、同じチームとして、「はやぶさ」チームとして言えるような、要するに逆に言うところの困った時があったらこういう提案をする、姿勢制御装置が困ったらイオンエンジンが助けしてくれるというのはまさにその通りで、他のシステムに関してもお互いに知っていてサジェッションしながらやっていけたということが成功に結びついたかなと思います。なかなかやりにくいところもあったのだと思いますが、各メーカーの方なり大学なりJAXAが一致団結してというのがまさしくそうで、とにかくこれをやり遂げなければ、まず一つはとにかくNASAには負けたくないという非常に高い目標を立てた分、そしてそれをやると決めたからには最後までやりとげるといふ意思が皆をそういうふうな勇気づけたんだろうと今私はそういうふうな感じてます。なかなか回答が難しいのですけれど、お互い同じチームであるという認識と情報をとにかくオープンにしてお互いに仲間として提案していったという体制が出来たというのが非常に大きいことで、たぶんこれは、たくさんの人数ではできなかった。もう一つ言うと、ちょっと最初言わなかったのですが、このミッションがスタートした時に、やり始めた年代が30代、40代なのです。それで惑星探査は時間がかかるので、途中で定年になったりして辞めていったりするとなかなかその人のノウハウが伝わらない。ですから最初やる時に若手ですけれど、30代を中心にスタートしたのが実は大きいです。最初から最後まで関われるミッションをみんなでやれたというのがたぶん一つの原動力になったのかなと今は思います。よろしいでしょうか。

#### 《司会》

ほかにごいませんか。ほかに何か付け加えることがあればお願いいたします。

#### 《久保田講師》

「はやぶさ」に関しては、ほんとに実は20年位かけたミッションで、計画に10年くらい、実際に開発するのに6年、ミッションは4年で終わると思ったら7年かかってしまった非常に長いミッションで、ほんとに何度も言うように諦めかけたことは何度もありますが、一つはスタッフが自分達で設計して開発して運用もしていたのです。そういう最初から関わってきたことで、全部が判っている人達がいたというのがひとつ成功の原因で、そうすると何かトラブルがあった時に何とか対応出来てきた。ウルトラCを連発したと言ってもいい位なのですが、逆に別の見方をするとなんでそんな設計になっていたのだ

というふうにする人もいます。ホイールをもう一個積んでいたらよかったのではないのかとか、いろいろなことを言う人もいますけれど、結局は限られた重量、電力、期間、コストの中でいかに最大限にするかという知恵を絞った結果なんとか出来たんだろうなど。これをまた同じようにやるというのは実は「はやぶさ2」では、結構大変だと思います。当時の部品があるわけではないし、新規開発になるのにも近いのですが、なんとか得られた技術を次の世代に活かさなくてはいけないかなと思っています。ですから「はやぶさ2」も比較的若手で今検討体制を作っていて、私もどちらかというとお年寄り組に入ってしまうのですが、なんとか技術の継承というのをしていきたい。そのためにはやはり実践をしなくてはいけない。ですから「はやぶさ2」をやるというのは新しい科学と同時に技術を磨いていく、更に新しい技術を付け加えないとその技術は使った時から陳腐になって行くわけなのです。そういうことを考えて先の戦略を練っていかなくてはいけないのかなと非常に痛感したミッションだと思います。非常に長いですが、次の世代に繋げるというのは、非常に重要であるというメッセージを「はやぶさ」自身が燃え尽きて見せてくれたのではないかなと思います。それでちゃんとカプセルを落としたりするのはそういうことなんだろうなというふうに川口プロマネはお話をしていました。

何か聞きたいことがあればぜひ何でも結構ですし、終わった後まだちょっと時間があれば個別に聞いていただいても結構です。今日はお集まりいただいて本当にありがとうございました。

### 《司会》

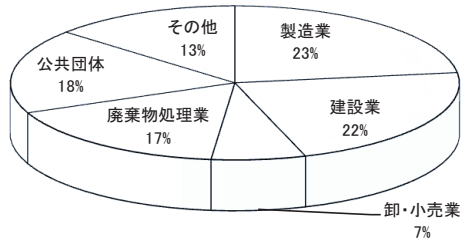
どうもありがとうございます。私も若い力が大変大事だということを学ばせていただきました。また「はやぶさ」の内容も大変面白く聴かせていただきました。ありがとうございました。これで今日のシンポジウム的一切を終わります。

皆様本当に長い間ありがとうございました。お気をつけてお帰り下さい。

平成22年度環境シンポジウムアンケート結果

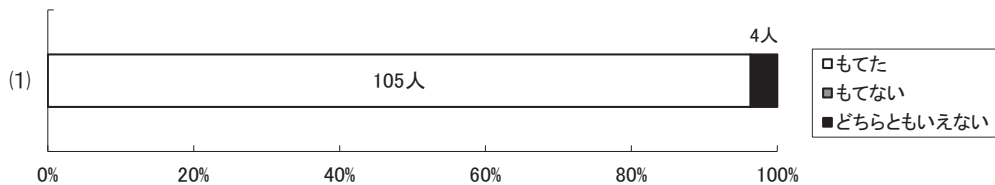
1 あなたは、次のどの業種に該当しますか。

配布枚数	200
回収枚数	109
回収率	54.5%



2 本日のシンポジウムについてお聞きします。

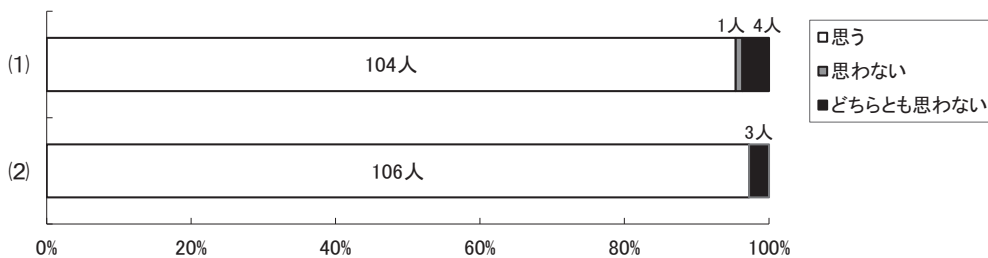
(1) 講演内容は興味のもてるものでしたか。



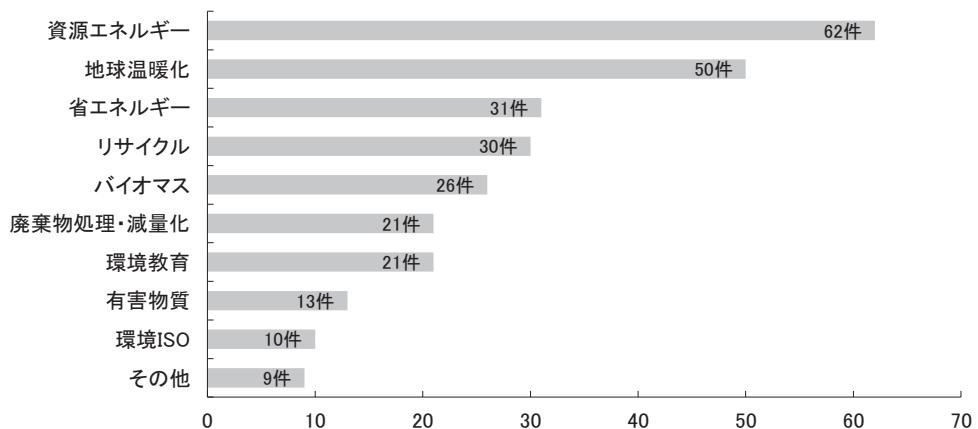
3 今後もこのようなシンポジウムを開催していきたいと考えておりますが、

(1) 継続的に開催するべきだと思いますか。

(2) これからも参加してみたいと思いますか。



(3) 今後、聞きたいと思うテーマをお選びください。(複数回答)



# 財団法人宮城県環境事業公社環境方針

## 理 念

廃棄物処理を通じて、県土の良好な環境と県民の健康な生活の確保に寄与してまいります。

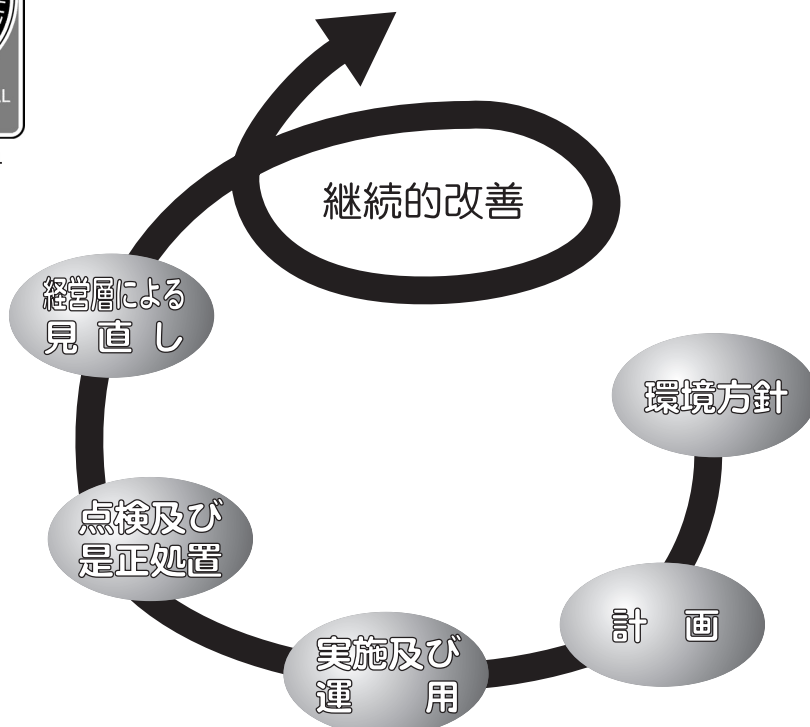
## 方 針

- 1 法律、条例及び協定等を遵守すると共に、宮城県循環型社会形成推進計画及び宮城県環境基本計画に沿い、廃棄物の適正かつ安全な処分に努めます。
- 2 埋立処分にあたっては、安全な処分を第一に考えると共に、埋立後の跡地利用を考慮しながら地域住民や地域環境との調和を図ってまいります。
- 3 環境への負荷の少ない資源循環型社会をめざして、リサイクルシステムの支援に努めます。
- 4 低炭素社会に向けて、省資源・省エネルギーに努めます。
- 5 環境汚染物質の削減及び作業工程での環境への配慮に努め、環境汚染の未然防止・継続的な改善を推進します。
- 6 環境目的・環境目標を定め継続的な進行を図ると共に、環境目的・環境目標は環境保全活動の実施状況を確認し、随時見直しを行います。
- 7 この方針は I S O 要求事項への適合及び社会情勢を考慮し、定期的に見直しを行います。
- 8 この方針は公社内に掲示すると共に、職員及び関係者に環境カードを配布して周知を図ります。



JQA-EM1224

## ISO 14001 (国際規格)



---

平成22年度 環境シンポジウム

“小惑星探査機『はやぶさ』  
七年間の旅の軌跡”



発行日 平成23年3月

編集・発行 **財団法人 宮城県環境事業公社**

宮城県仙台市青葉区堤通雨宮町4番17号  
〒981-0914 TEL 022-275-9161(代)



印刷 新生印刷株式会社 500部

---

◎この冊子は財団法人宮城県環境事業公社の平成22年度環境シンポジウムの内容をまとめたものであり、その文責は公社にあります。

◎この本の無断転載を禁じます。



